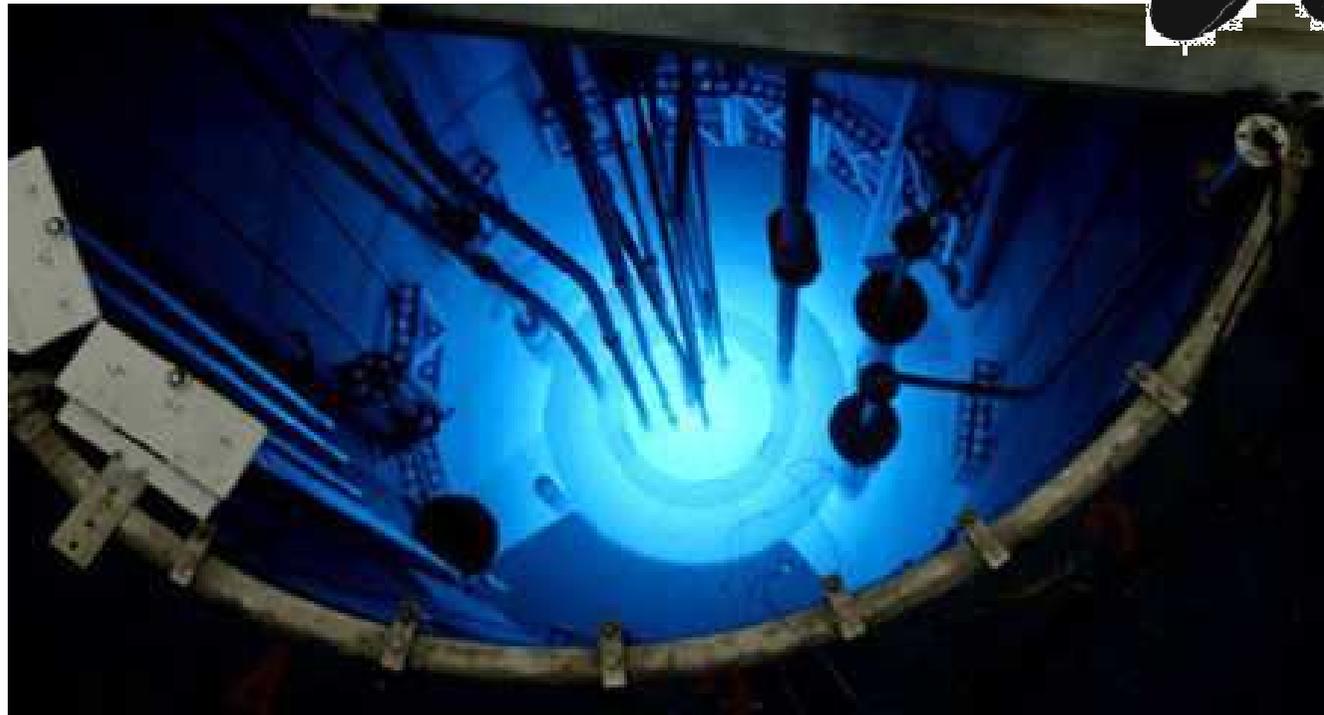


DUE PASSI NEL NUCLEARE: DA OKLO A FUKUSHIMA



Michele Prata

Astro Siesta – IASF Milano - INAF

19 gennaio 2012



Michele Prata

Responsabile del Servizio di Fisica Sanitaria



Laboratorio Energia Nucleare Applicata

Centro Servizi Interdipartimentale

Università degli Studi di Pavia

Via Aselli 41 – 27100 Pavia



+39 0382 98 7306



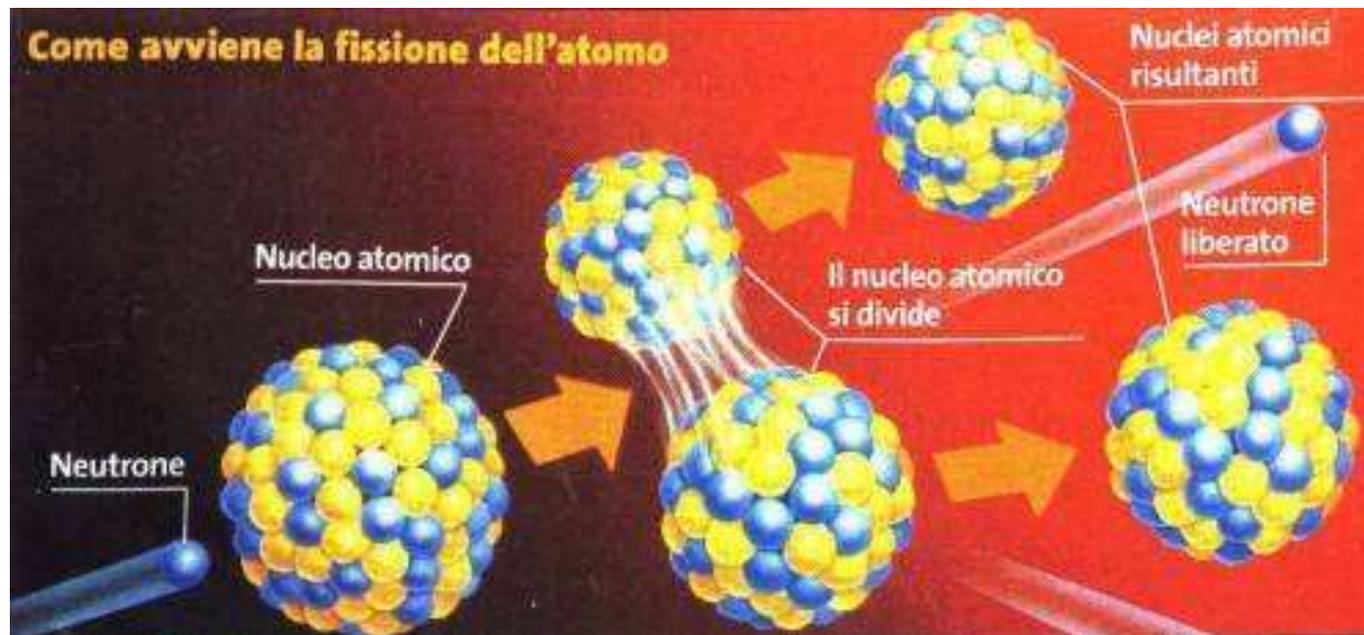
e-mail: michele.prata@unipv.it



Web site: <http://www.unipv-lena.it/>

Un po' di Fisica: la Fissione Nucleare

- ❖ La **Fissione Nucleare** è il frazionamento del nucleo atomico di un elemento pesante (**nucleo fissile**) in 2 parti approssimativamente uguali detti **frammenti di fissione**
- ❖ La fissione può avvenire spontaneamente o essere provocata bombardando il nucleo con un **neutrone**

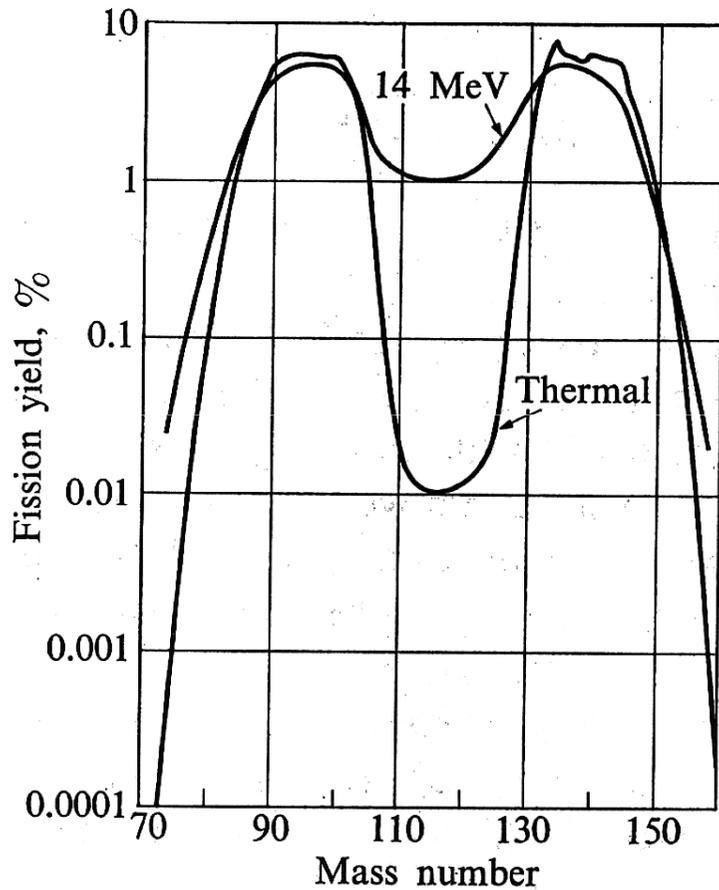


Un po' di Fisica: la Fissione Nucleare

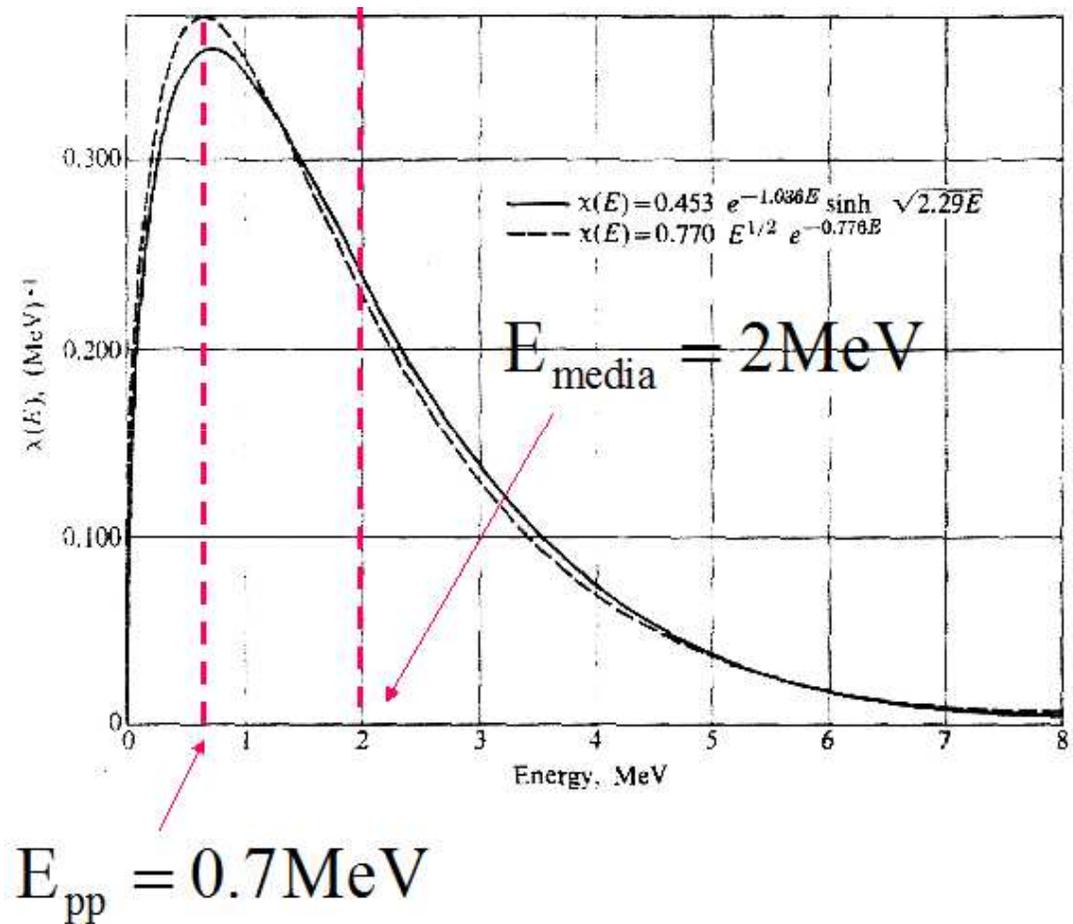
- ❖ Durante il processo di fissione, contemporaneamente alla produzione dei due frammenti, avviene anche l'emissione di **2÷3** neutroni (detti **neutroni pronti**), neutrini e raggi γ
- ❖ Altri neutroni, detti **neutroni ritardati**, vengono emessi successivamente dai frammenti di fissione che, essendo nuclei instabili, decadono



Un po' di Fisica: la Fissione Nucleare



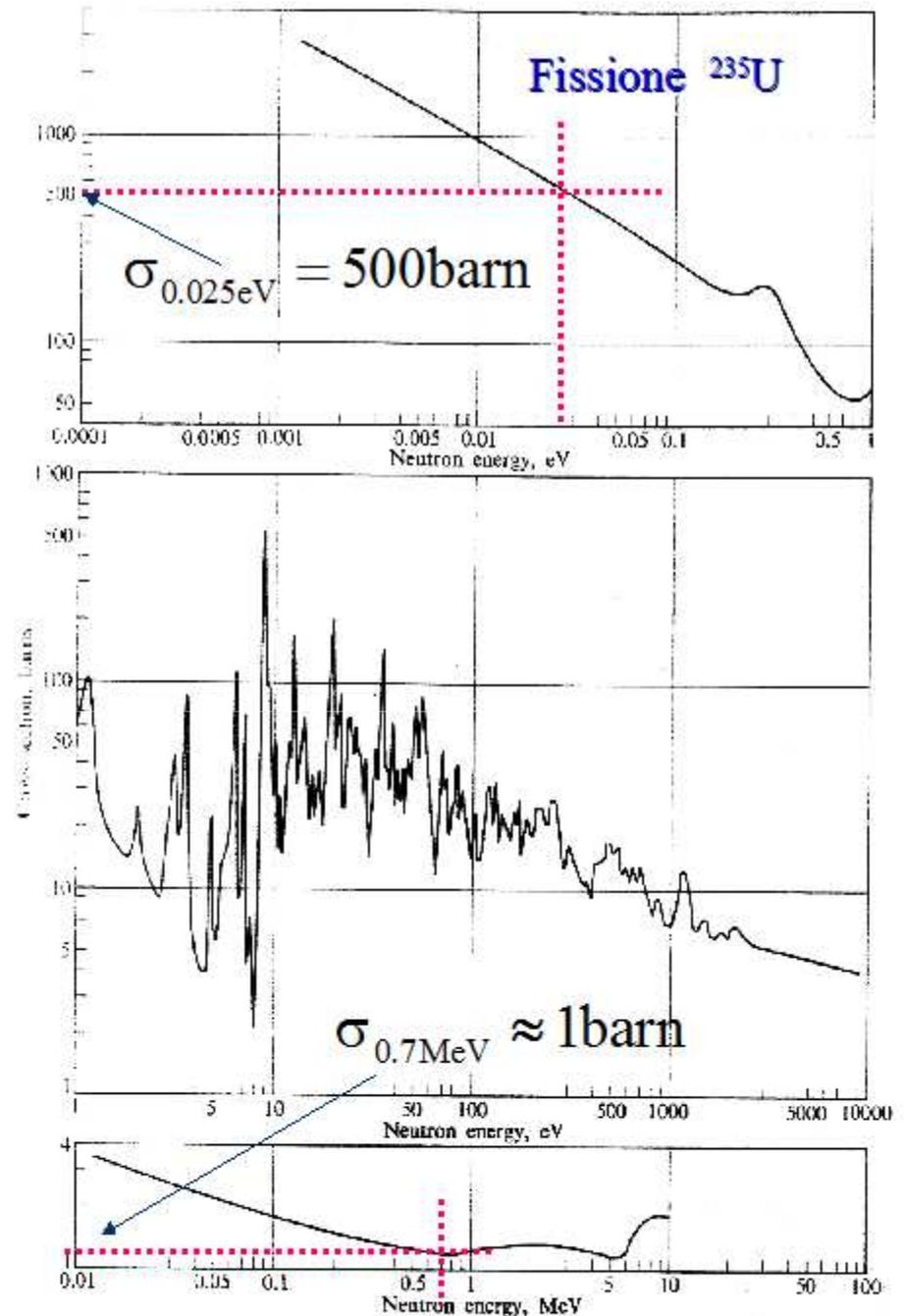
Distribuzione dei frammenti di fissione



Distribuzione di energia dei neutroni pronti

Sezioni d'Urto di Fissione

- ❖ La Sezione d'Urto di Fissione dell' ^{235}U con neutroni pronti ($E \sim 0.7$ MeV) è **~ 1 barn**
- ❖ Se i neutroni vengono moderati fino ad essere in equilibrio con l'ambiente (neutroni termici) la sezione d'urto di fissione sale a **500 barn**



Moderazione dei Neutroni

- ❖ La **Moderazione dei neutroni** avviene attraverso urti elastici con nuclei leggeri
- ❖ L'**energia minima** che può raggiungere un neutrone con energia iniziale **E** dopo un urto elastico con un nucleo con numero di massa **A** è

$$E_{\min} = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2 E \quad \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2 = \begin{cases} 0 & \text{H} \\ 0.716 & \text{C} \\ 0.983 & \text{U} \end{cases}$$

Energia Liberata

Energia liberata dalla
fissione di un **nucleo**
di ^{235}U ~ **200 MeV**

Emitted and Recoverable Energies for Fission of ^{235}U

Form	Emitted energy MeV	Recoverable energy MeV
Fission fragments	168	168
Fission product decay		
β - rays	8	8
γ - rays	7	7
neutrinos	12	-
Prompt γ - rays	7	7
Fission neutrons (kinetic energy)	5	5
Capture γ - rays	-	3-12
Total	207	198-207

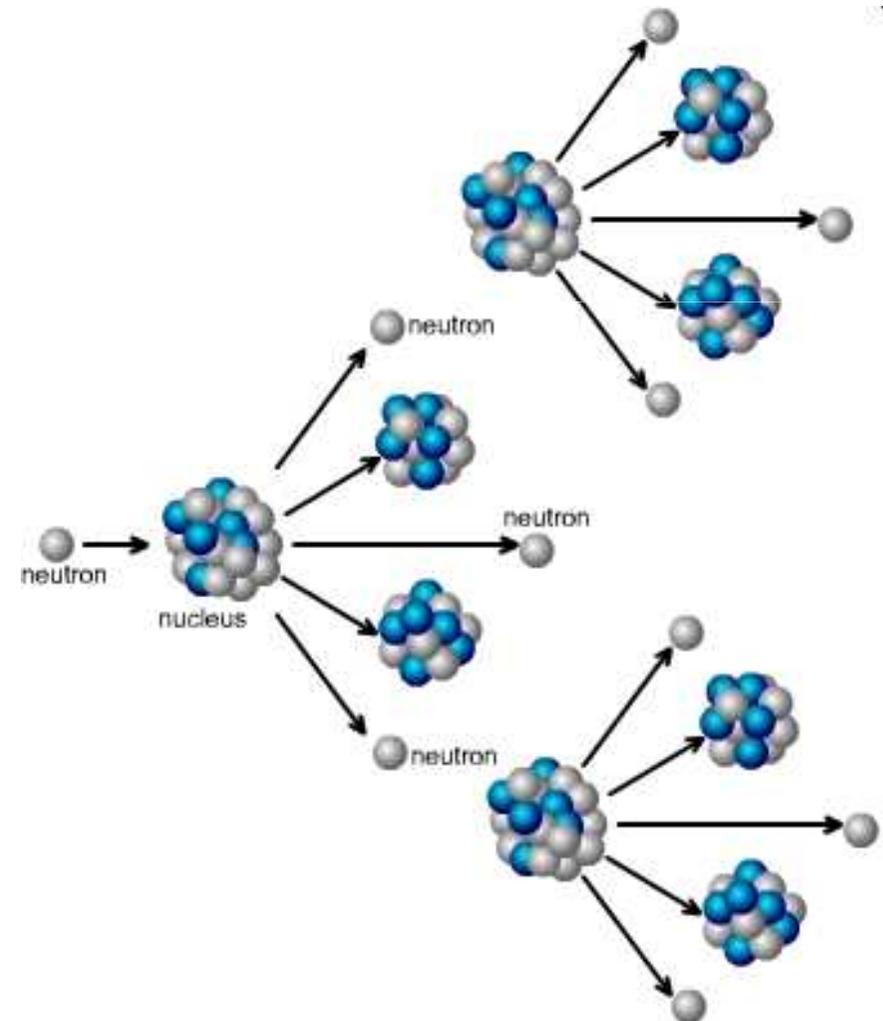
Energia liberata dalla
combustione di un **atomo**
di **Carbonio** ~ **4 eV**



La Reazione a Catena

La **potenza del reattore** è proporzionale al numero di fissioni
⇒ dipende dalla popolazione neutronica

- ❖ **Reattore critico:** la densità dei neutroni è costante
- ❖ **Reattore sovracritico:** la densità dei neutroni aumenta nel tempo
- ❖ **Reattore sottocritico:** la densità dei neutroni diminuisce nel tempo

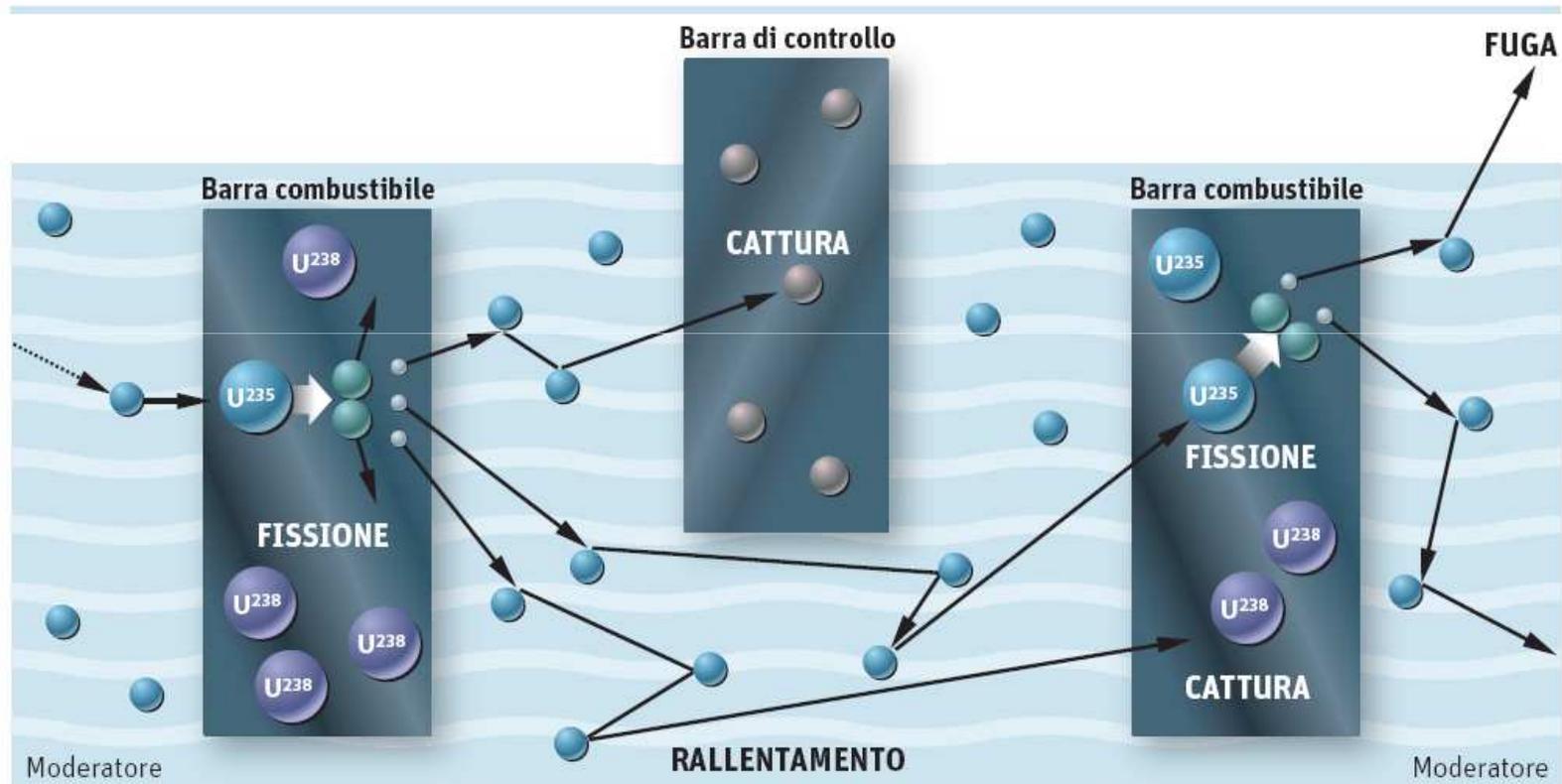




Controllo della Reazione a Catena

- ❖ Una volta innescata la reazione a catena è possibile controllare la densità della popolazione neutronica mediante le **barre di controllo**
- ❖ **Barre di Controllo:** sono costituite da materiale con elevate sezione d'urto di assorbimento dei neutroni (p.es. Carburo di Boro)
- ❖ La movimentazione delle barre di controllo determina un aumento della popolazione neutronica (salita a potenza) una diminuzione o mantiene la potenza costante (**condizioni di criticità**)

Controllo della Reazione a Catena



Gli ingredienti per un reattore nucleare



❖ **Il combustibile:** nuclei fissili ^{235}U

Il minerale di uranio naturale contiene **0.720%** in peso di ^{235}U e **99.275%** di ^{238}U \Rightarrow per ottenere la massa critica occorre arricchire il combustibile

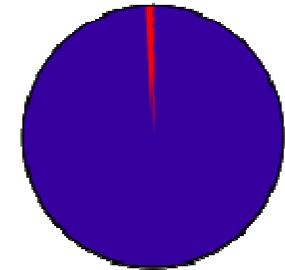
❖ Reattori di potenza: **3-4%**

❖ Reattori di ricerca: **20%**

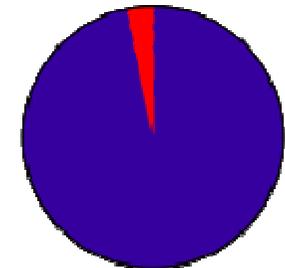
❖ **Il moderatore:** per moderare i neutroni pronti

❖ Acqua leggera H_2O

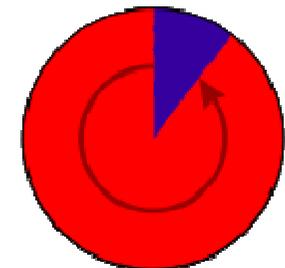
❖ Acqua pesante D_2O



Natural uranium
> 99.29% U-238
0.72% U-235



Low-enriched uranium
(reactor grade)
3-4% U-235



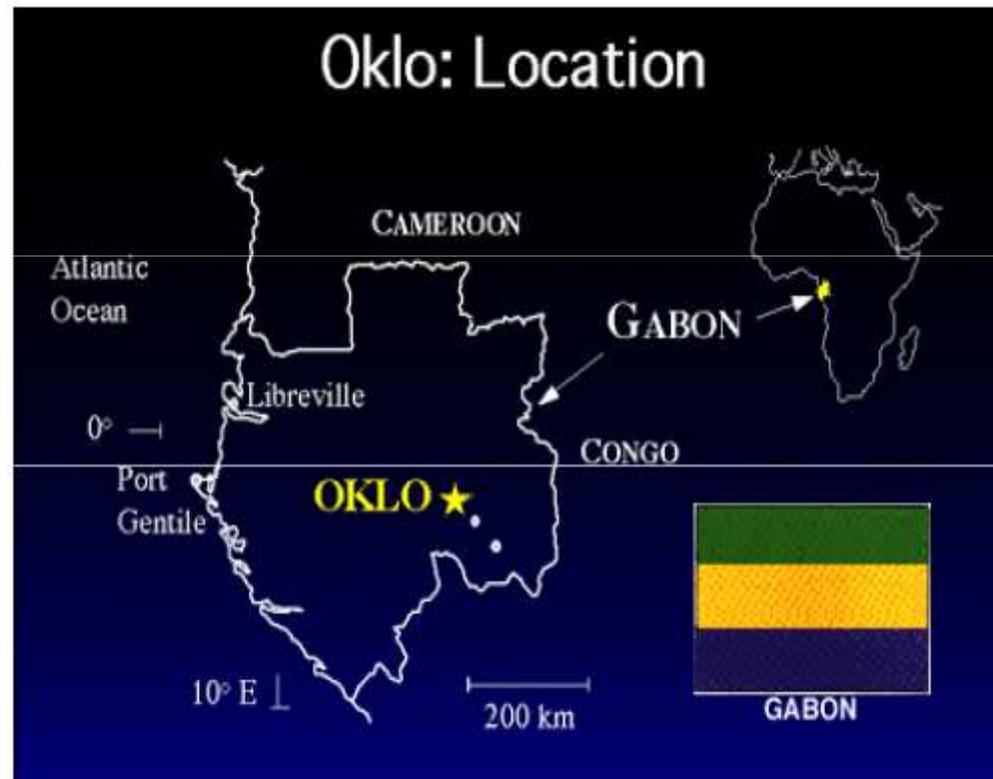
Highly enriched uranium
(weapons grade)
90% U-235

In che anno è avvenuta la prima criticità del primo reattore nucleare?



Nature is always one step ahead...

2 miliardi di anni fa ad Oklo, nel Gabon...

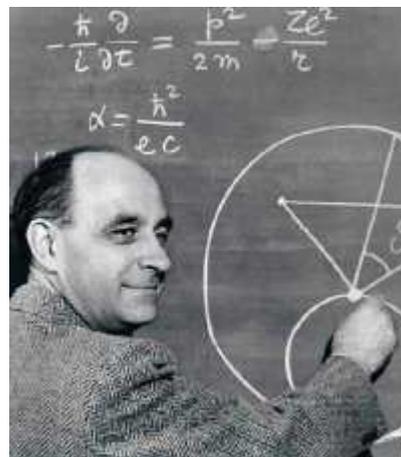


Nature is always one step ahead...

- ❖ ^{235}U $T_{1/2} = 7.038 \cdot 10^8$ anni
- ❖ ^{238}U $T_{1/2} = 4.468 \cdot 10^9$ anni
- ❖ Oggi $R = ^{235}\text{U} / U_{\text{nat}} = 0.00720$
- ❖ 2 miliardi di anni fa $R = ^{235}\text{U} / U_{\text{nat}} \sim 0.03$
che corrisponde alla percentuale di arricchimento del combustibile per reattori di potenza!
- ❖ **1 milione di anni** di funzionamento intermittente
($P_{\text{media}} \sim 20 \text{ kW}_{\text{th}}$)
- ❖ Consumo di circa **6 t** di ^{235}U
Prodotti di Fissione: **5.4 t + 1.5 t** di Pu
(mobilità dei prodotti di fissione: pochi cm in 1.5 miliardi di anni)
- ❖ **~ 100 TWh_{th}** prodotti
(pari a ~ 4 anni di produzione di un impianto nucleare da 1000 MW_e)

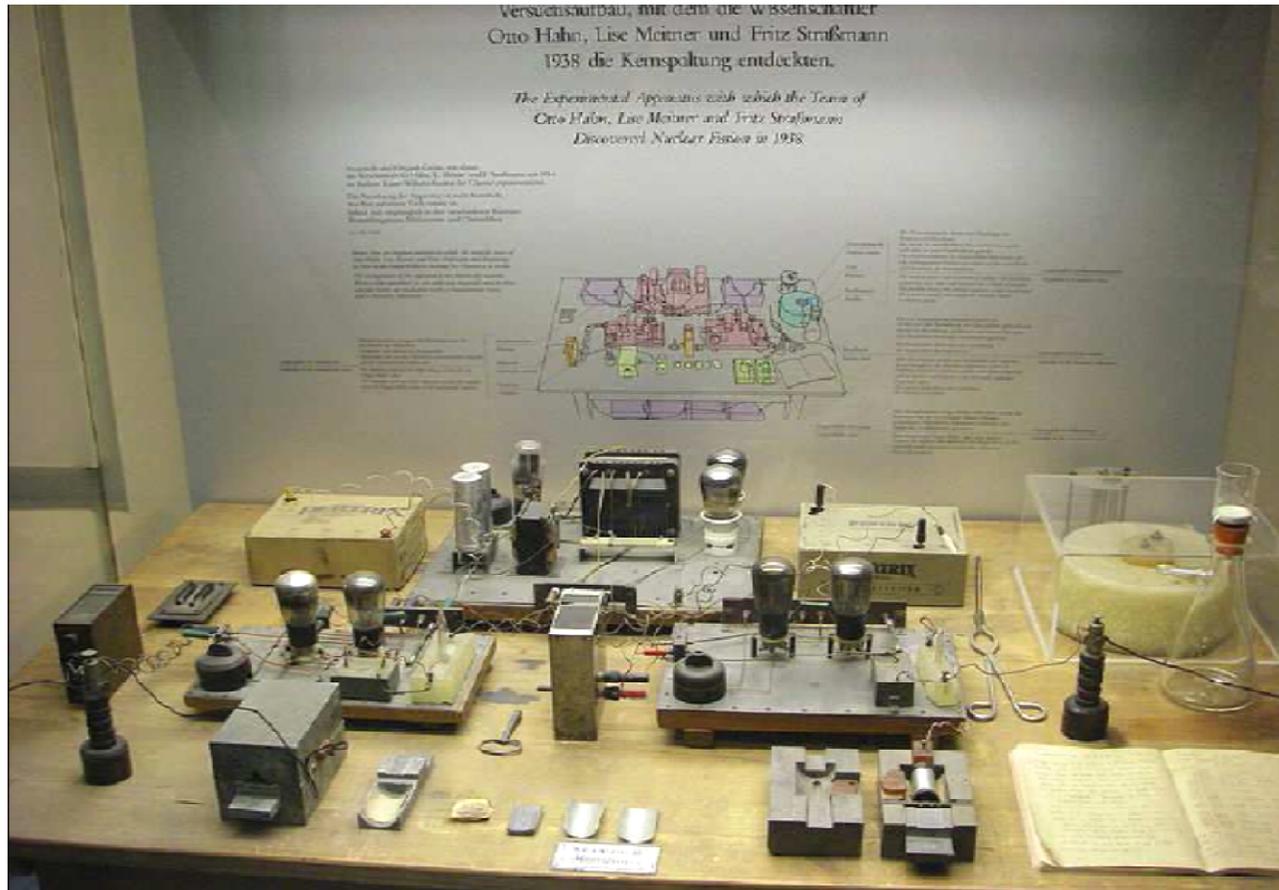
Un po' di storia "moderna"...

- ❖ **1932: James Chadwick** scopre il neutrone
- ❖ **1934: Enrico Fermi** e i "*Ragazzi di via Panisperna*" (Edoardo Amaldi, Franco Rasetti, Emilio Segrè, Bruno Pontecorvo e Ettore Majorana) sperimentano le prime reazioni nucleari indotte dal bombardamento di uranio con neutroni lenti



Un po' di storia "moderna"...

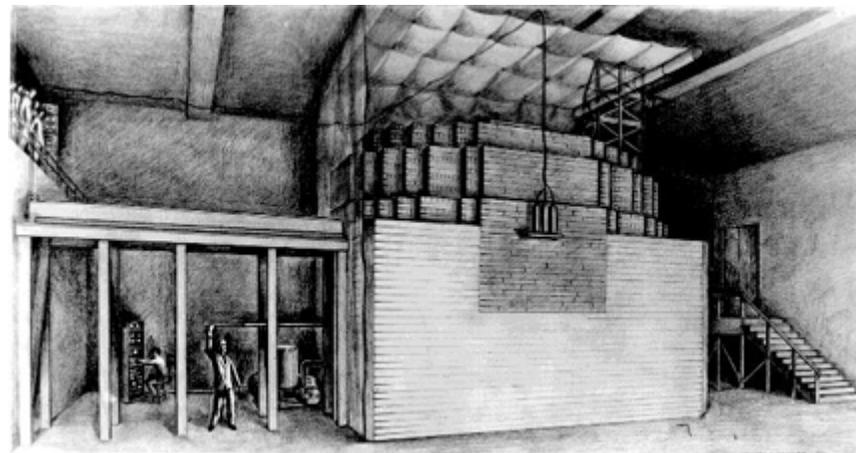
- ❖ **1938: Otto Hahn, Fritz Strassmans e Lise Meitner** sperimentano e spiegano la reazione di fissione nucleare dell'uranio



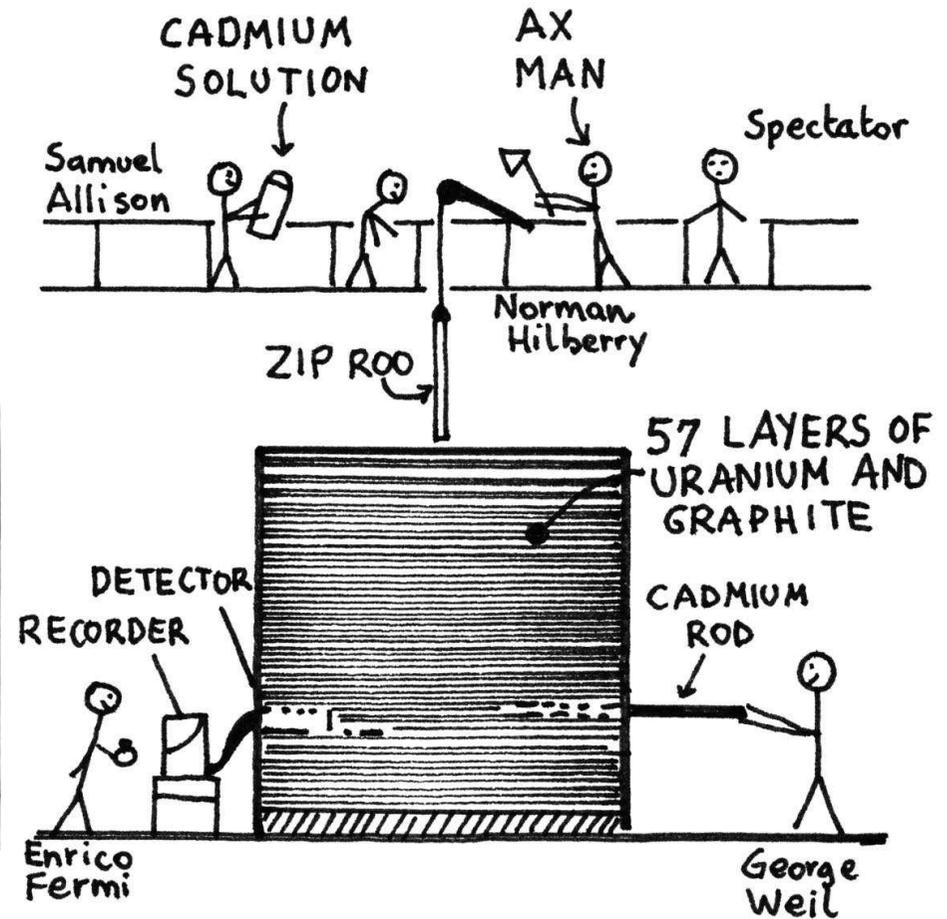
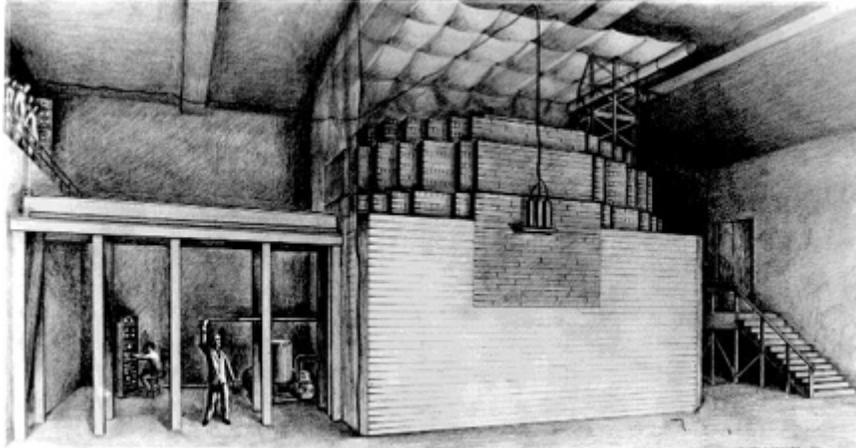
La “Chicago Pile-1”



- ❖ **2 dicembre 1942 ore 15.25:** sotto le tribune del campo sportivo dell'Università di Chicago (Illinois), **Enrico Fermi** realizza la prima fissione nucleare a catena auto-sostenuta (0.5 W per 28 minuti).
È il primo reattore nucleare a fissione (350 t di grafite + 36.5 t di UO_2 + 5.64 t di U_{nat} metallico)



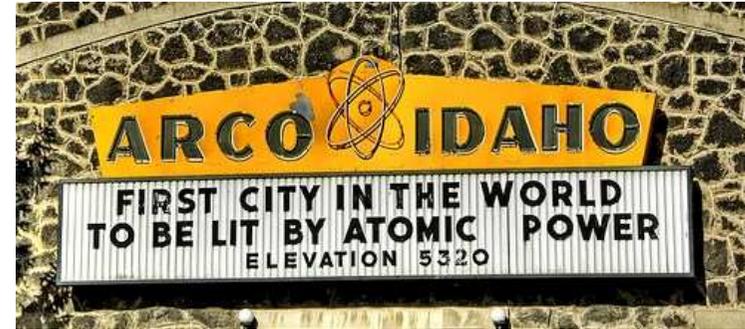
La "Chicago Pile-1"



THE FIRST REACTOR
 December 2, 1942

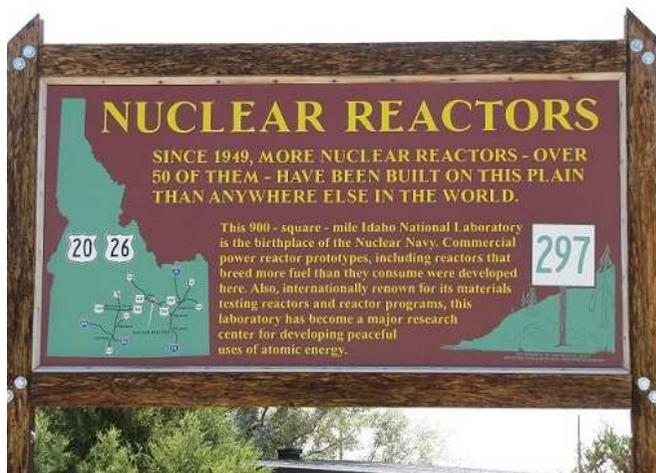
Raymond Murray

EBR 1: il primo Impianto Eletttronucleare

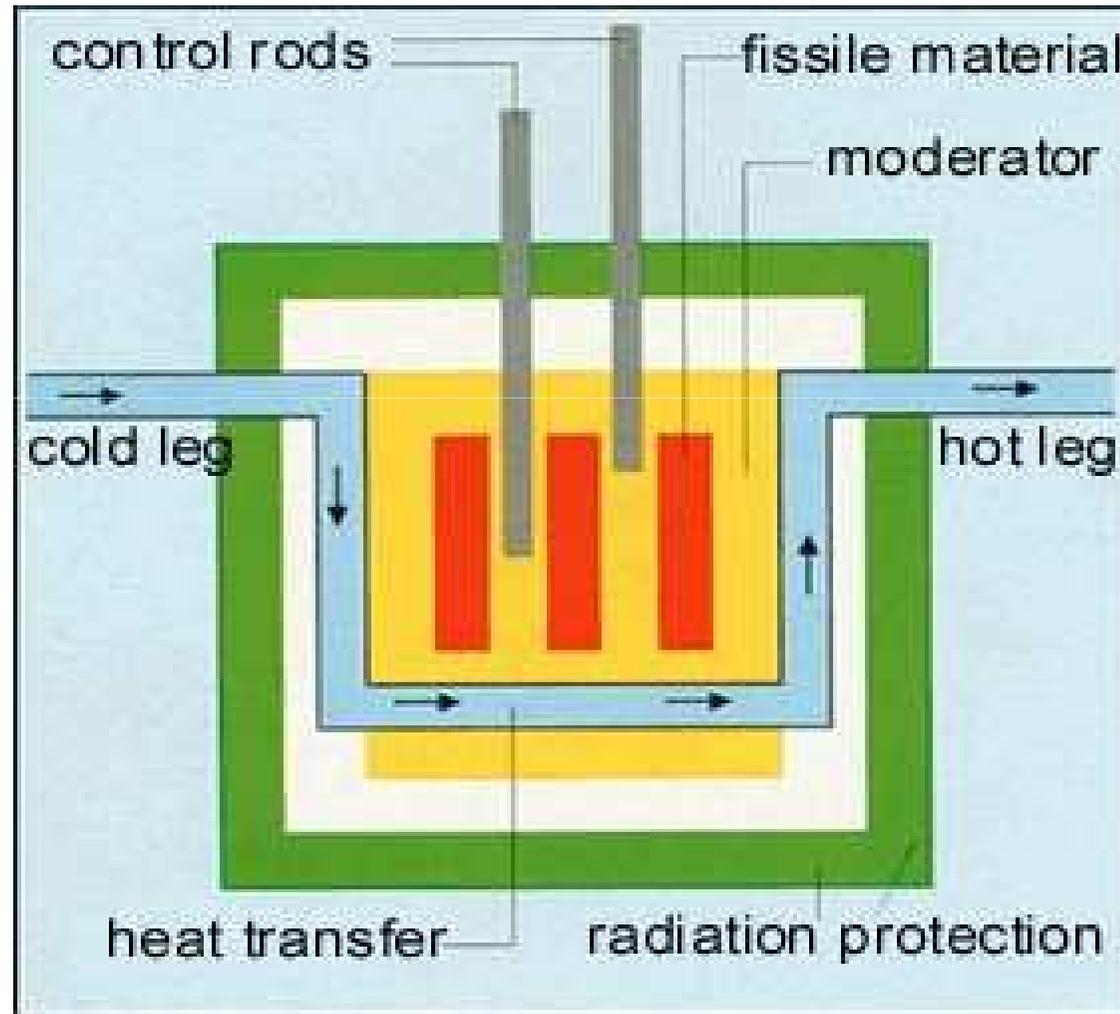


- ❖ **1951:** ad **Arco** nell'Idaho (USA) entra in funzione il **primo reattore nucleare per uso civile.**

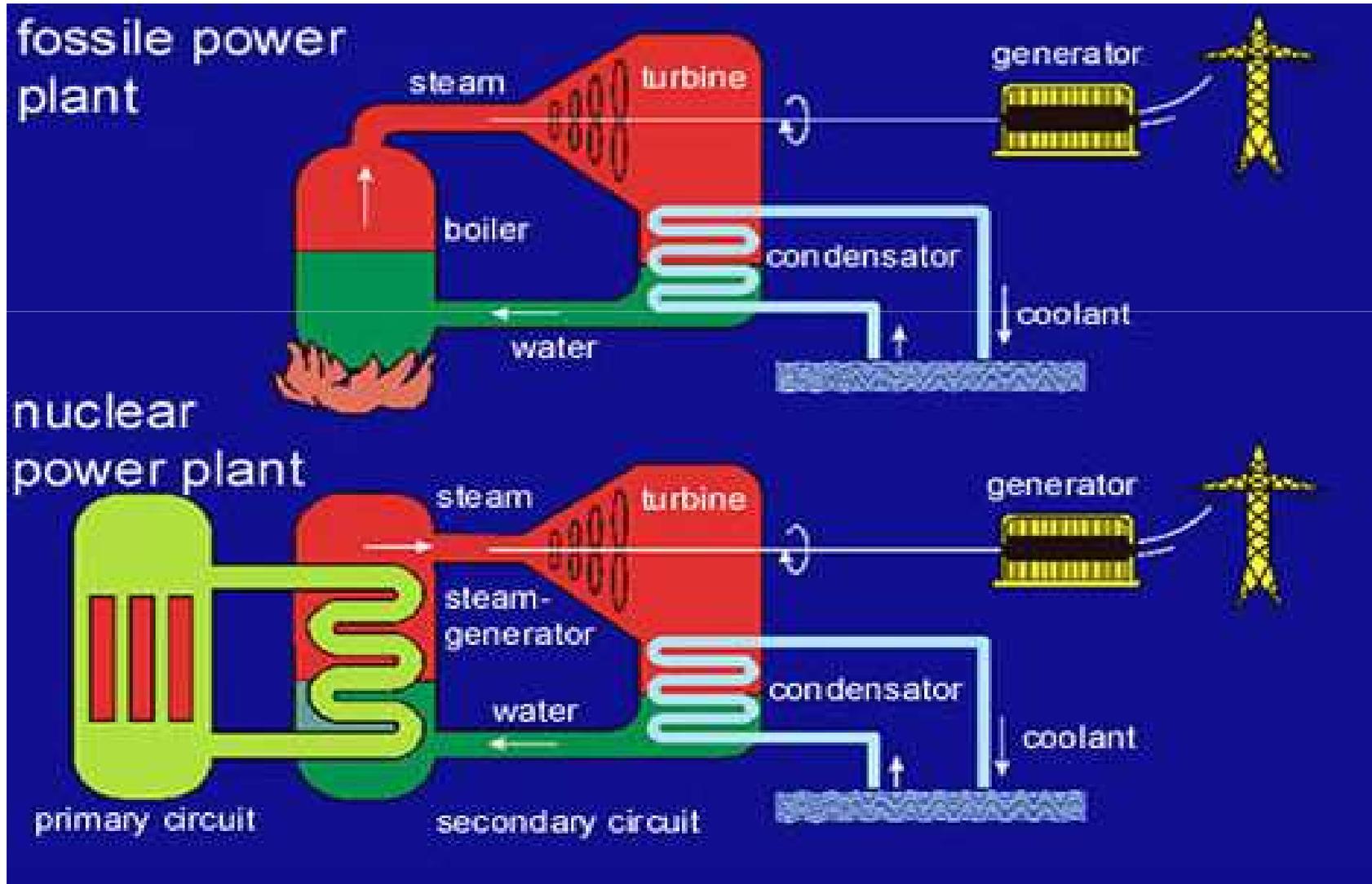
Alimenta quattro lampadine da 200 W ciascuna installate a 15 km di distanza dall'impianto.



Schema semplificato di un Reattore Nucleare



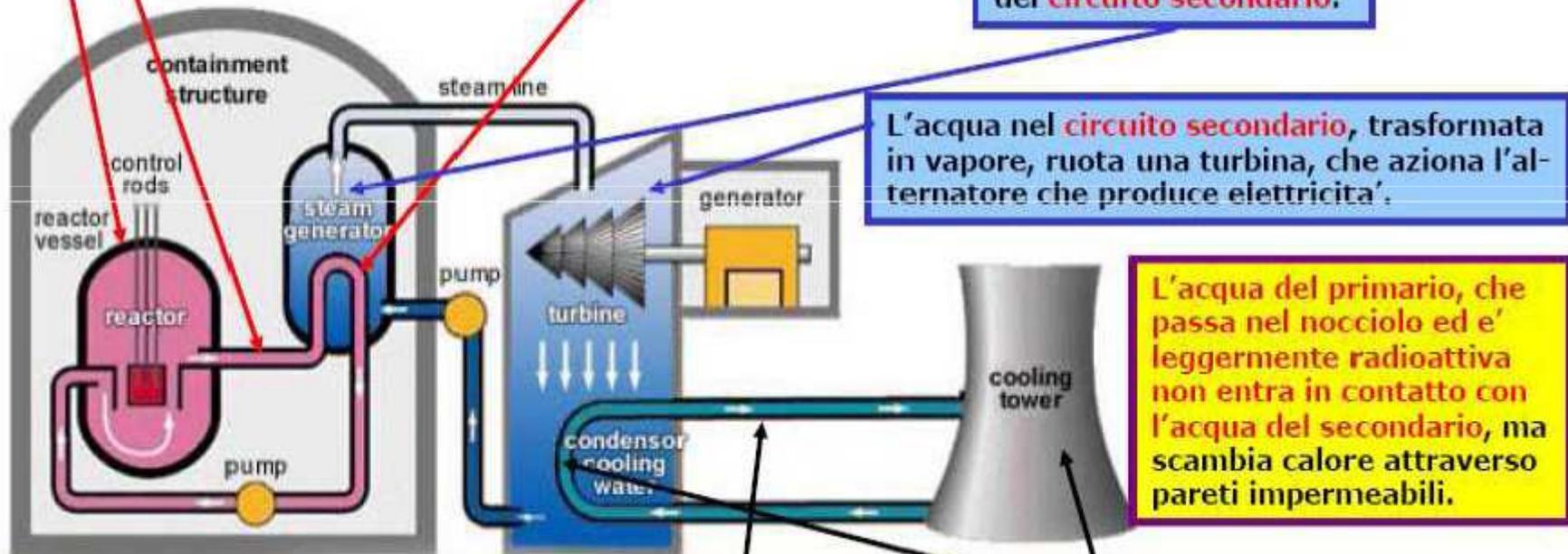
Schema semplificato del processo di Produzione di Energia Elettrica



Schema semplificato del processo di Produzione di Energia Elettrica

Il **contenitore** contenente il nocciolo del reattore e' parte del **circuito primario** che estrae dal **nocciolo** il calore prodotto dai processi di fissione e lo trasferisce mediante uno **scambiatore di calore** al ...

... **generatore di vapore** del **circuito secondario**.



L'acqua nel **circuito secondario**, trasformata in vapore, ruota una turbina, che aziona l'alternatore che produce elettricità.

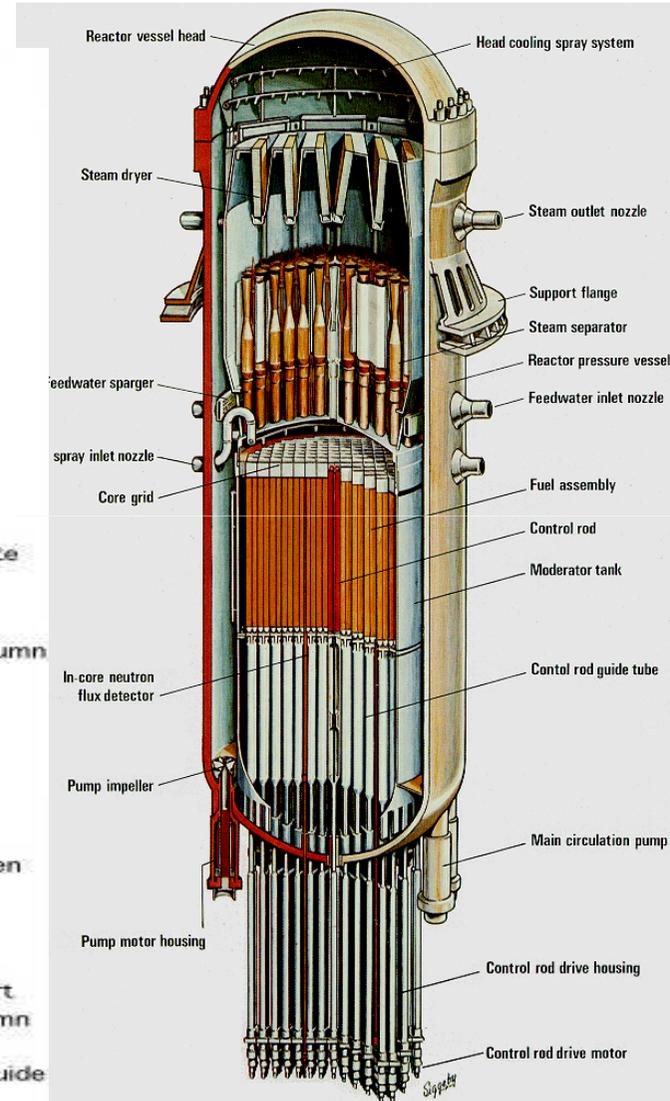
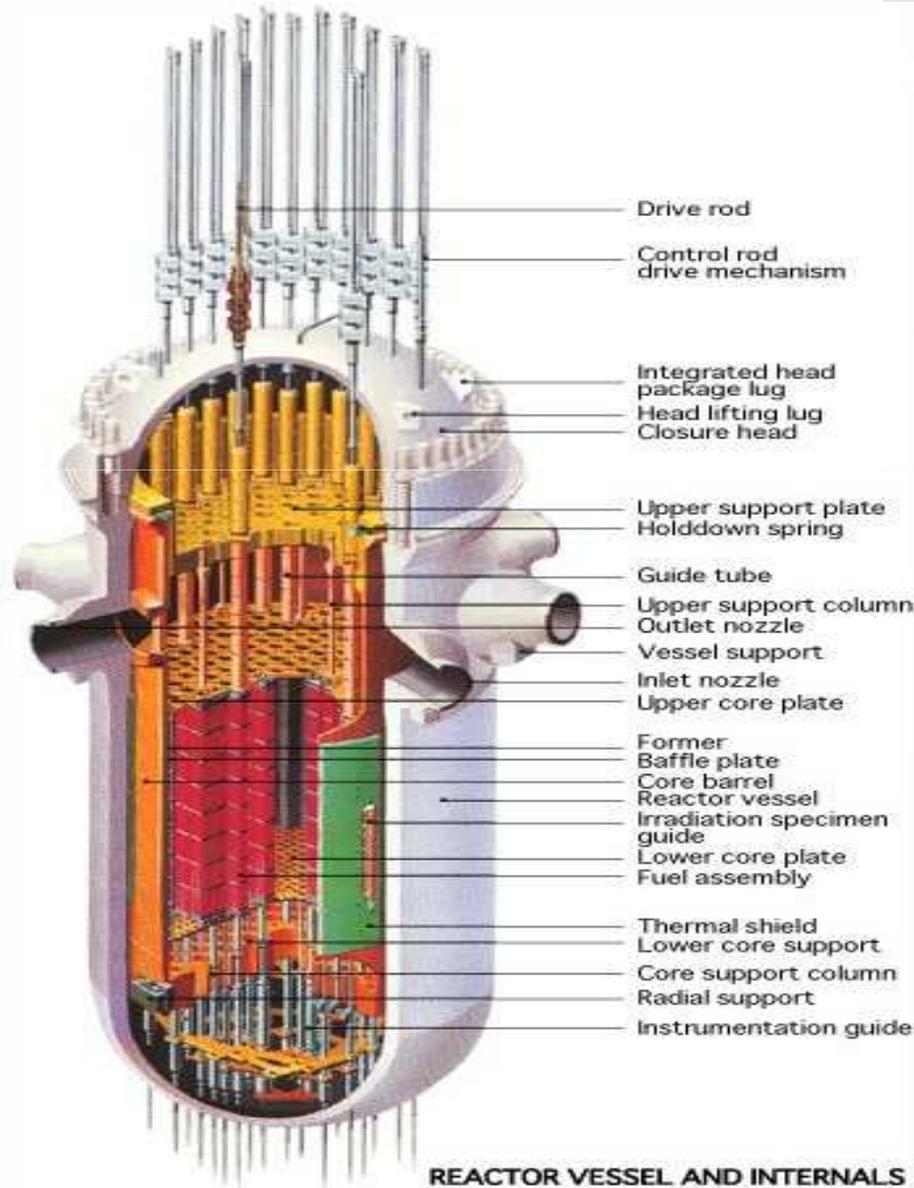
L'acqua del primario, che passa nel nocciolo ed e' leggermente radioattiva non entra in contatto con l'acqua del secondario, ma scambia calore attraverso pareti impermeabili.

Il vapore che esce dalla turbina, a basse T e p, entra in un **ultimo scambiatore di calore** che fa condensare l'acqua raffreddandola con un **3° circuito**; nel caso sia necessario raffreddare l'acqua dell'ultimo circuito, questa viene raffreddata ad aria tramite **torri di raffreddamento**.

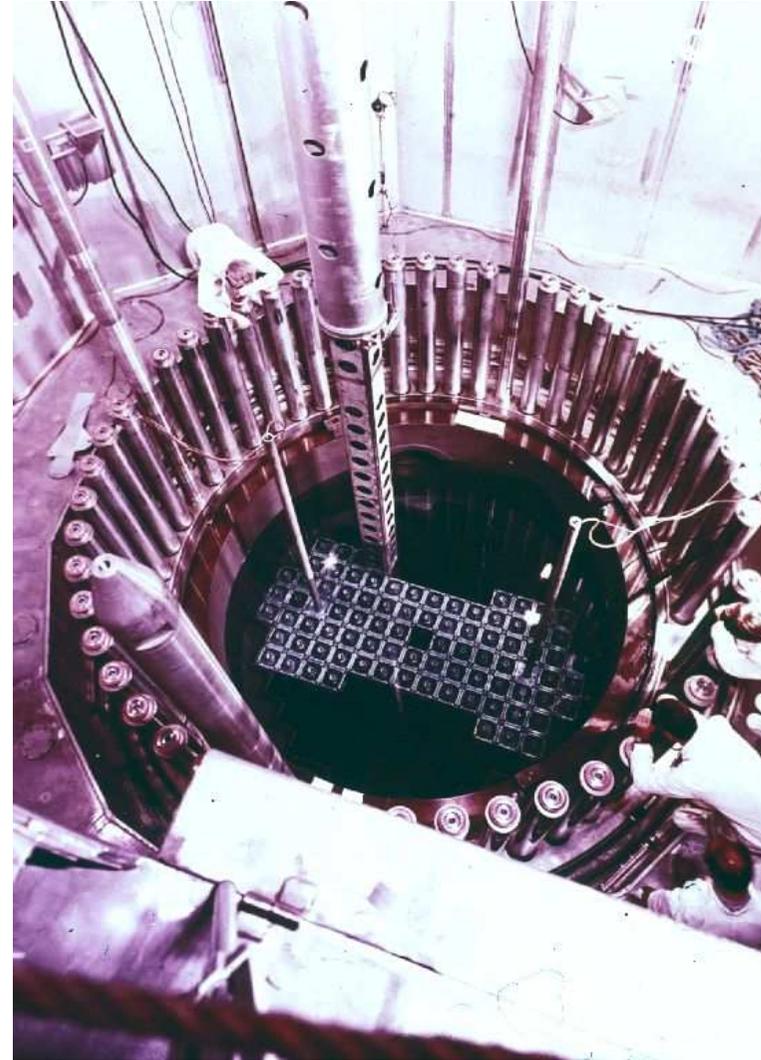
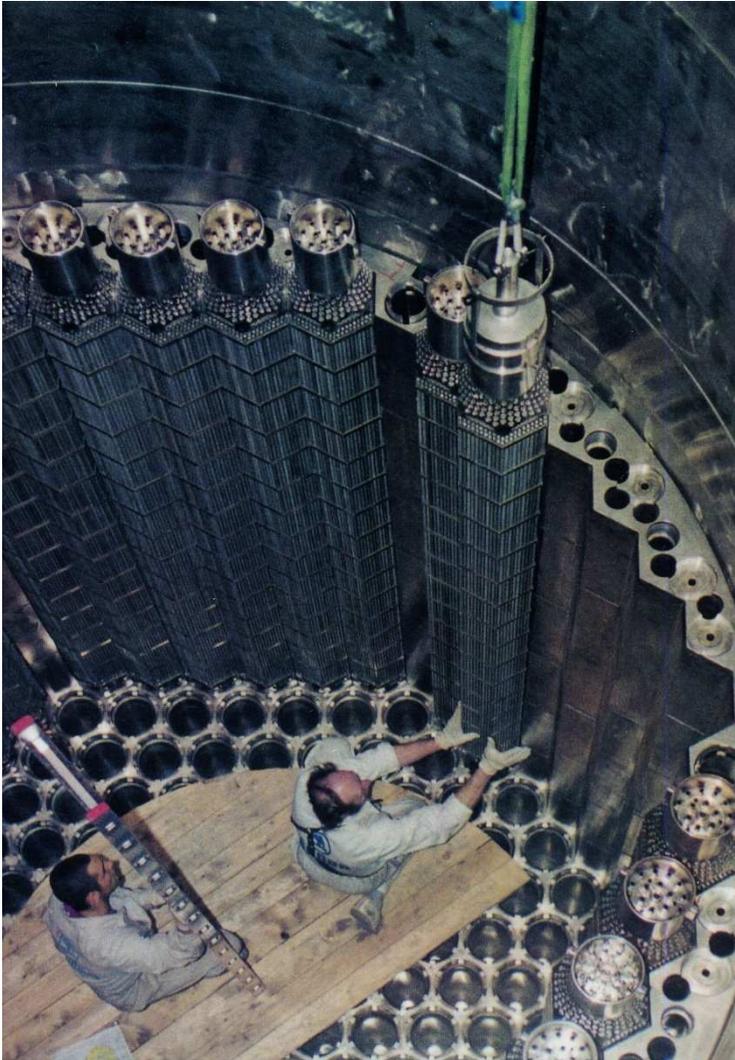
Elementi di Combustibile



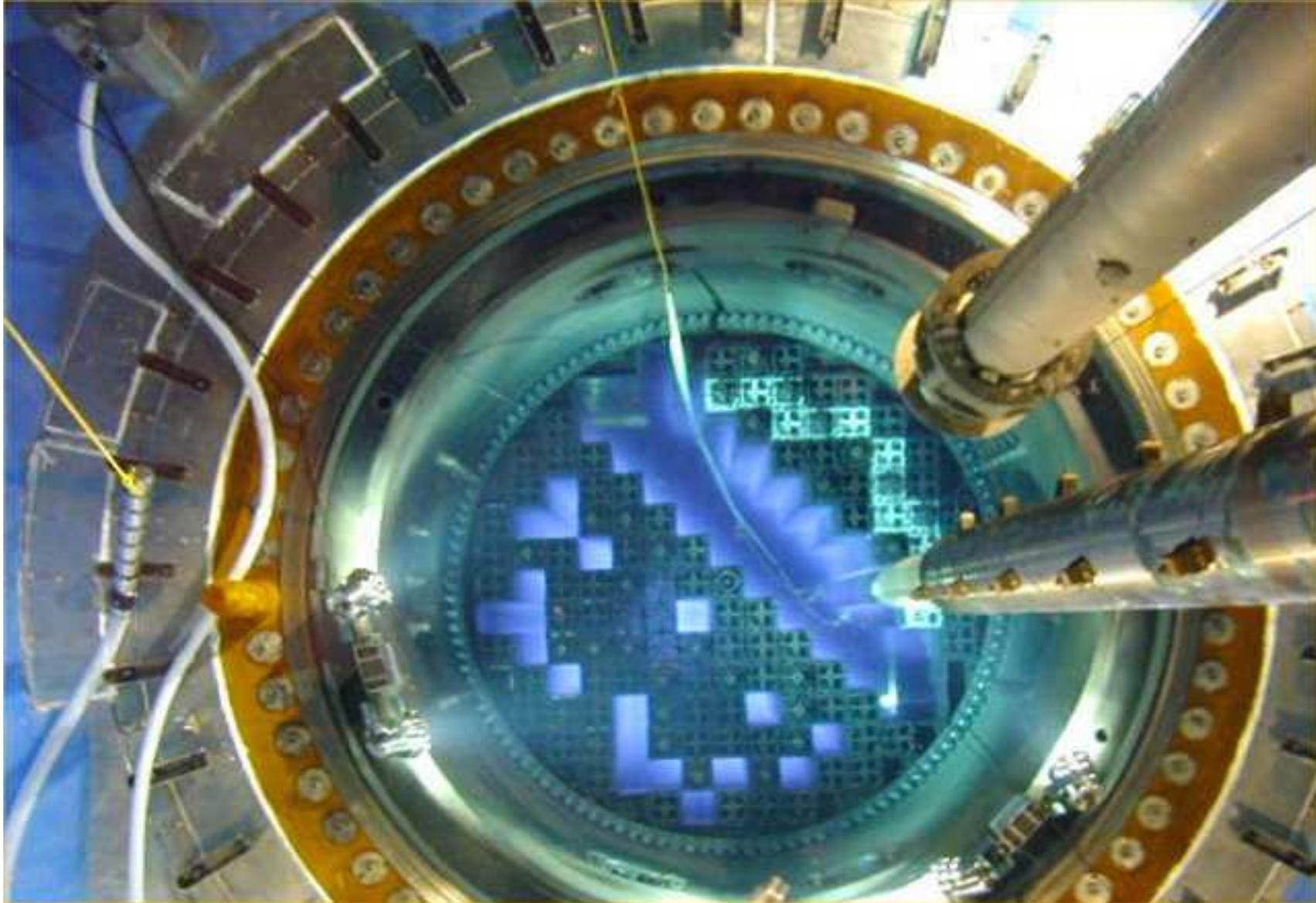
Reactor Pressure Vessel



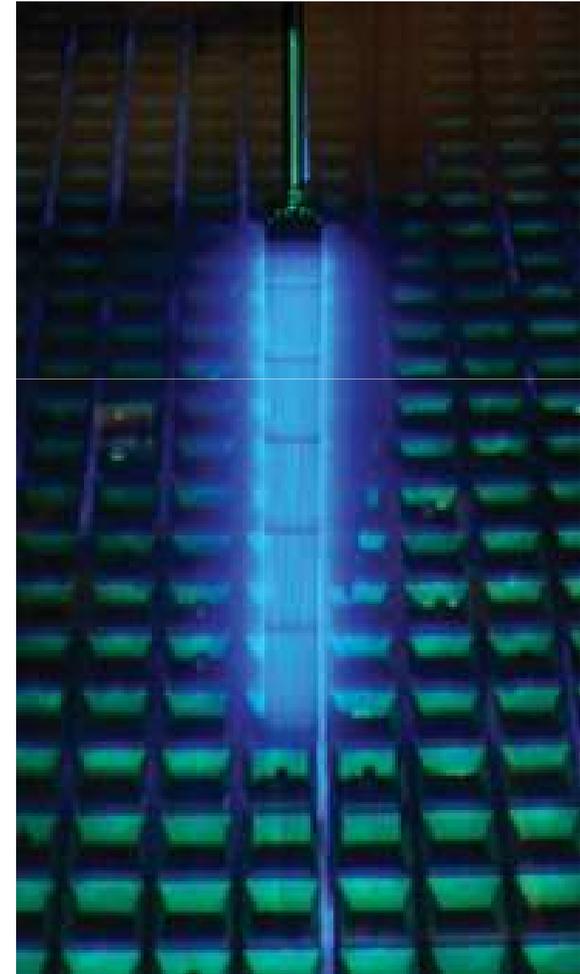
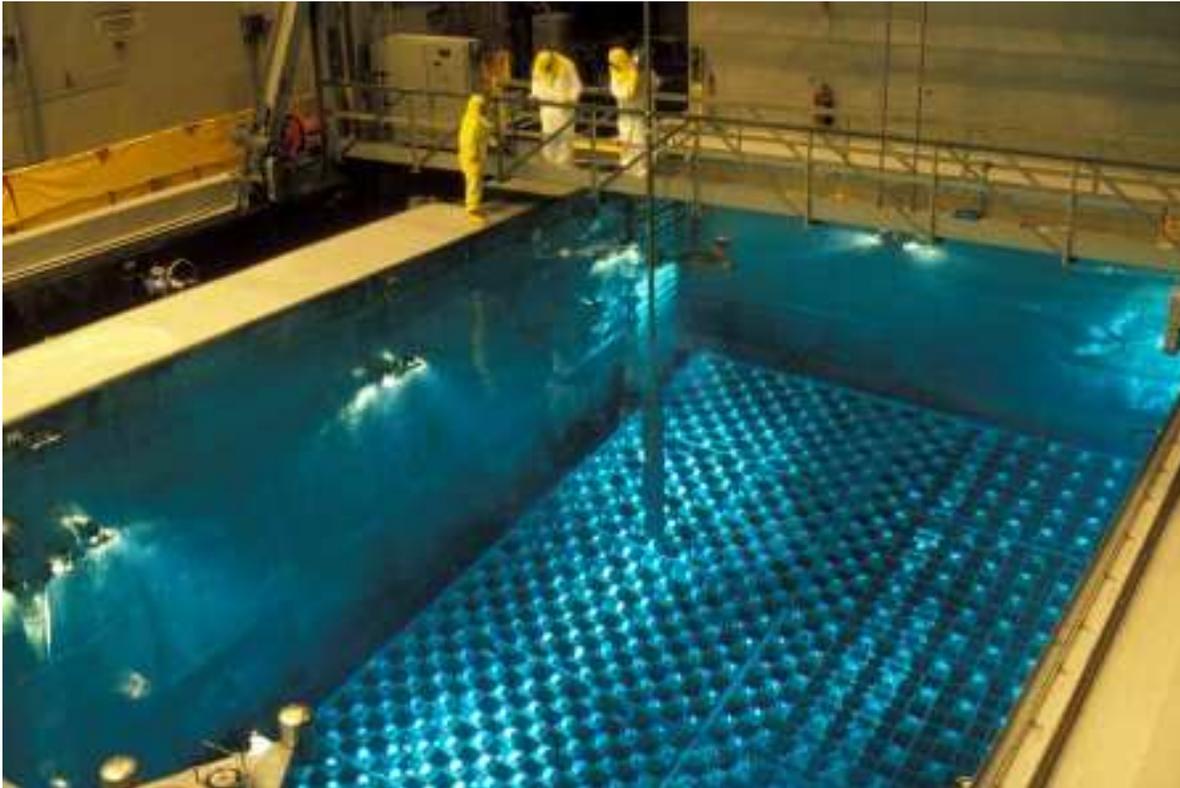
Caricamento del Nocciolo



Caricamento del Nocciolo

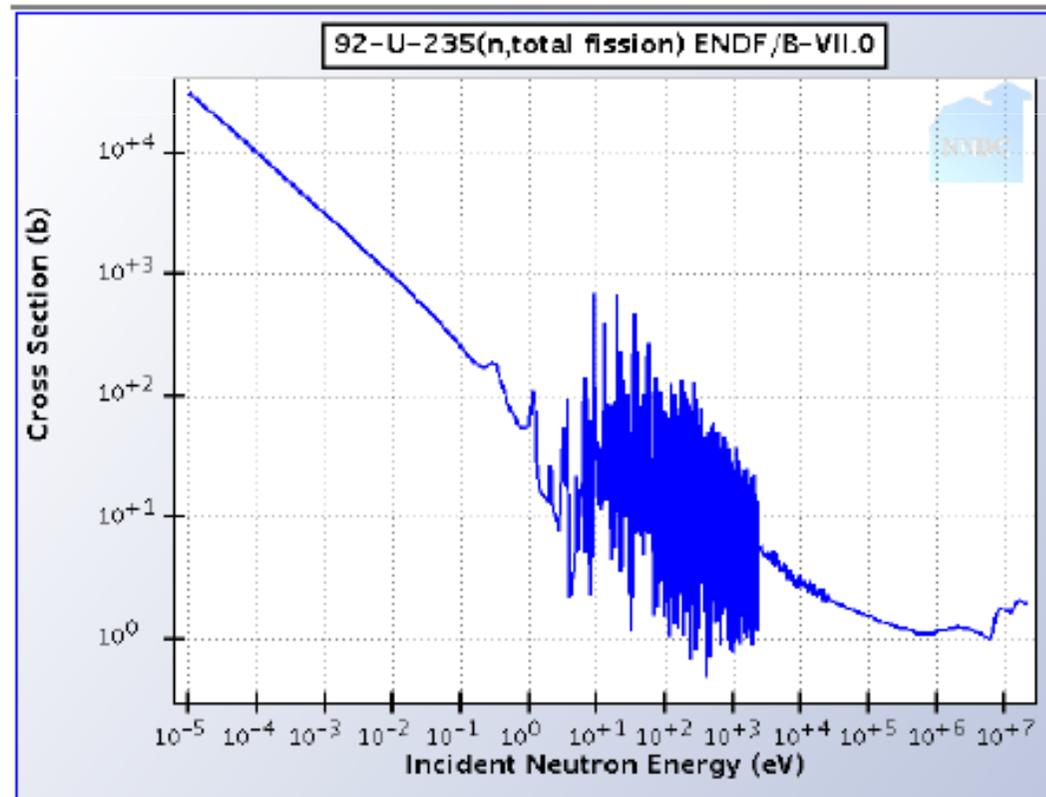


Piscina di Stoccaggio



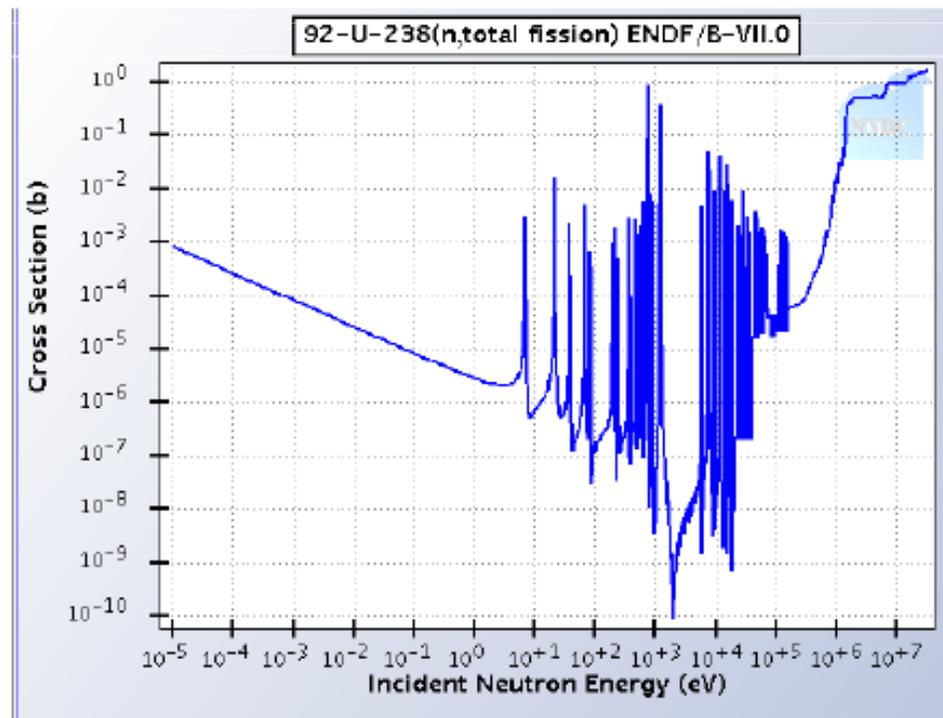
Reattori Termici

- ❖ Utilizzano prevalentemente neutroni di bassa energia ($< 1 \text{ eV}$) per sostenere la reazione di fissione nucleare.
- ❖ Poiché i neutroni di fissione “nascono” veloci, i reattori termici necessitano di un **moderatore** per rallentare i neutroni



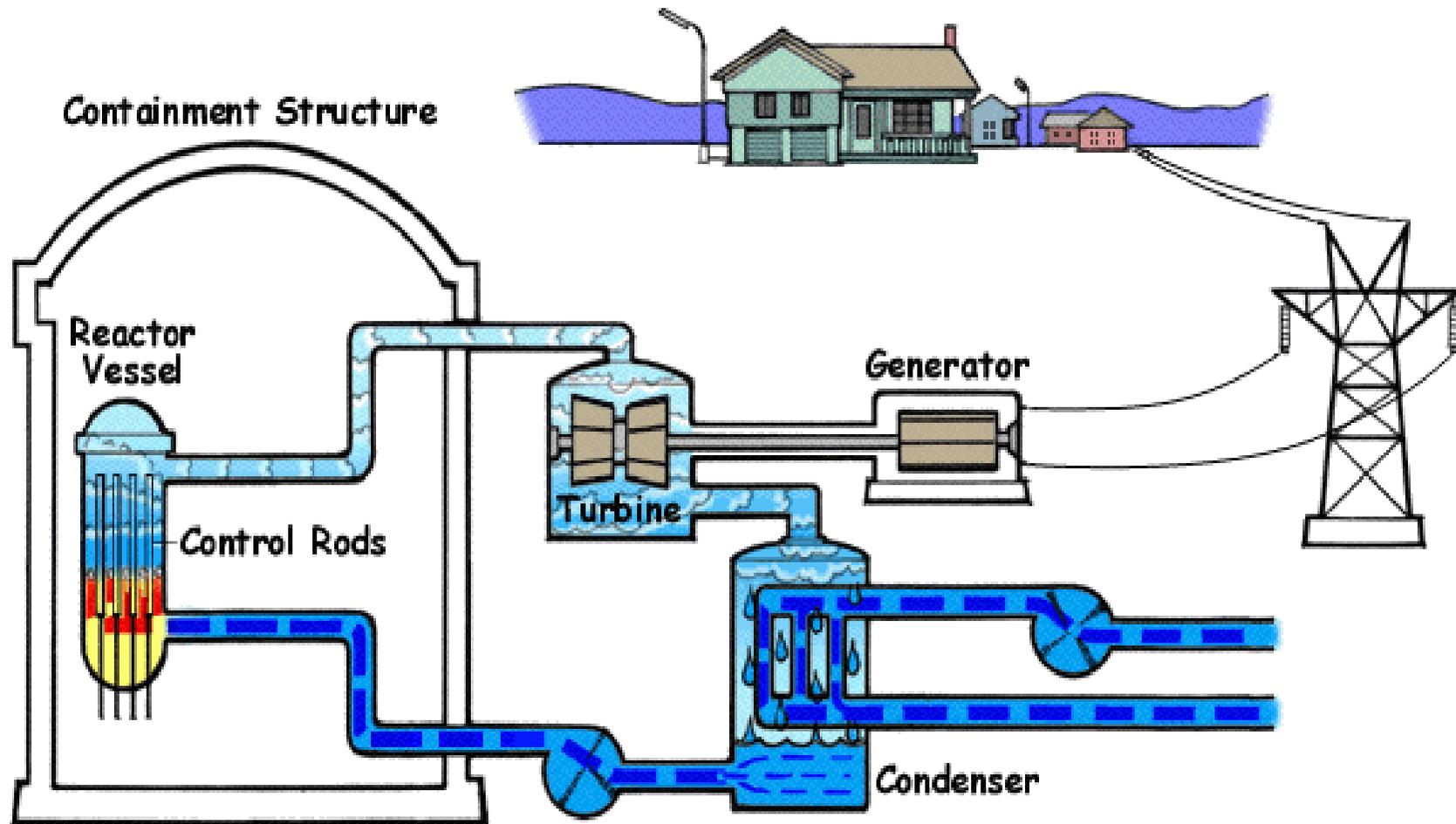
Reattori Veloci

- ❖ Utilizzano prevalentemente neutroni di energia dell'ordine dell'energia di fissione (~ **MeV**) per sostenere la reazione di fissione nucleare. Non hanno il moderatore.
- ❖ Possono essere utilizzati per convertire materiale **fertile** in materiale **fissile** (autofertilizzanti o “**Breeder**”)



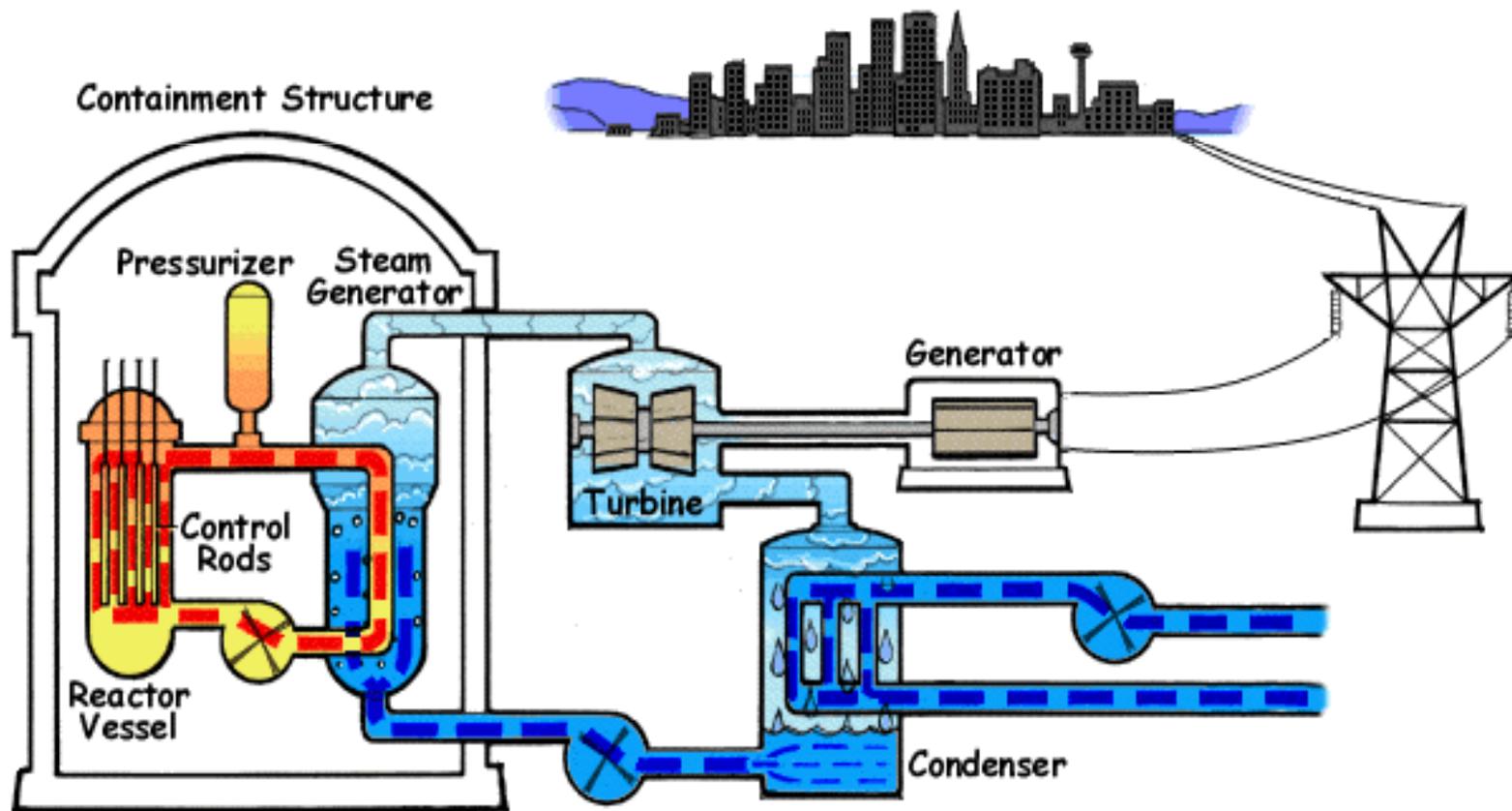
Reattori a Ciclo Diretto (BWR)

Il fluido termovettore che asporta il calore dal nocciolo del reattore viene direttamente immesso in turbina



Reattori a Ciclo Indiretto (PWR)

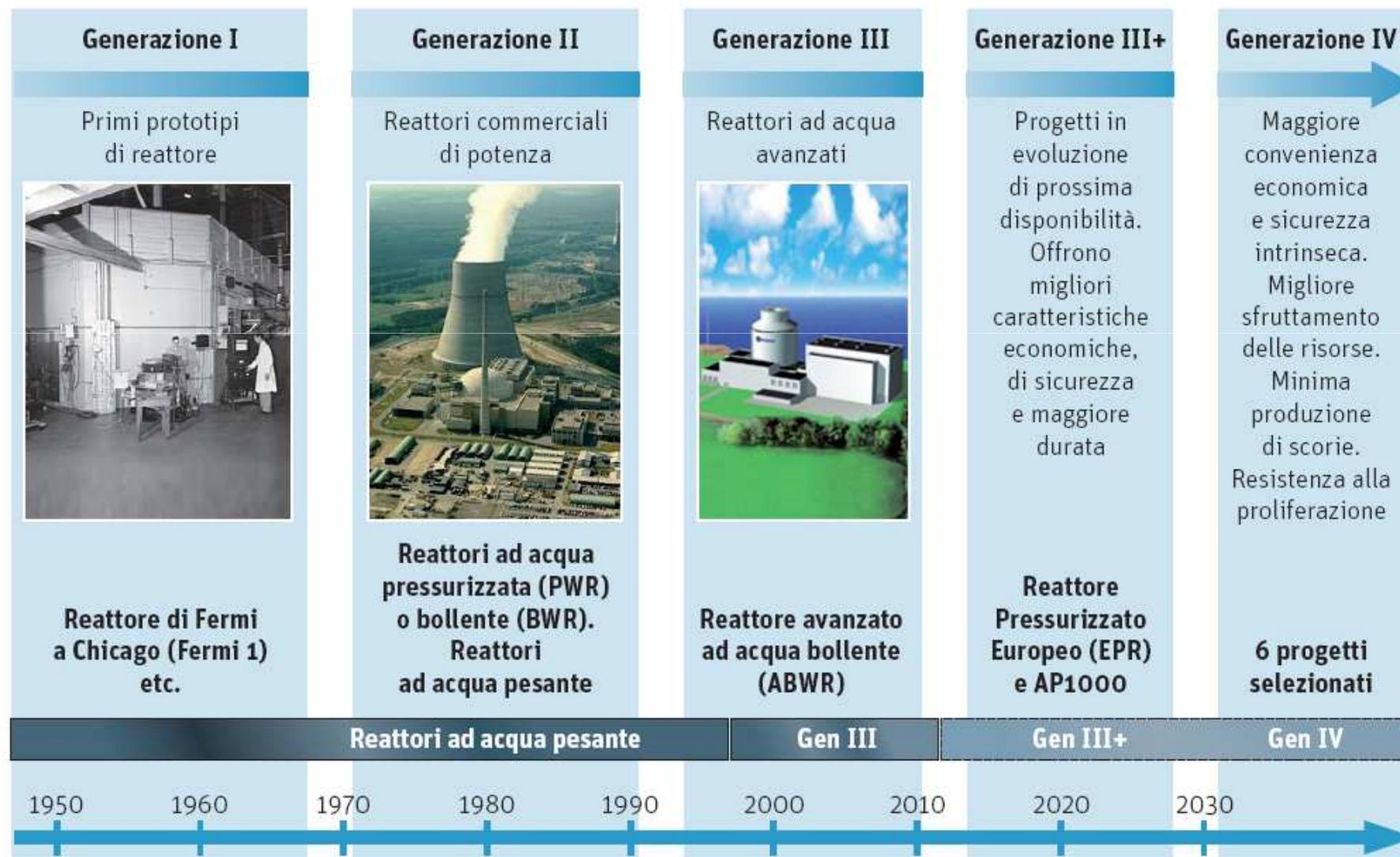
Il fluido termovettore che asporta il calore dal nocciolo del reattore cede il calore attraverso uno scambiatore/generatore di vapore ad un secondo fluido termovettore che viene immesso in turbina



Classificazione dei Reattori Termici

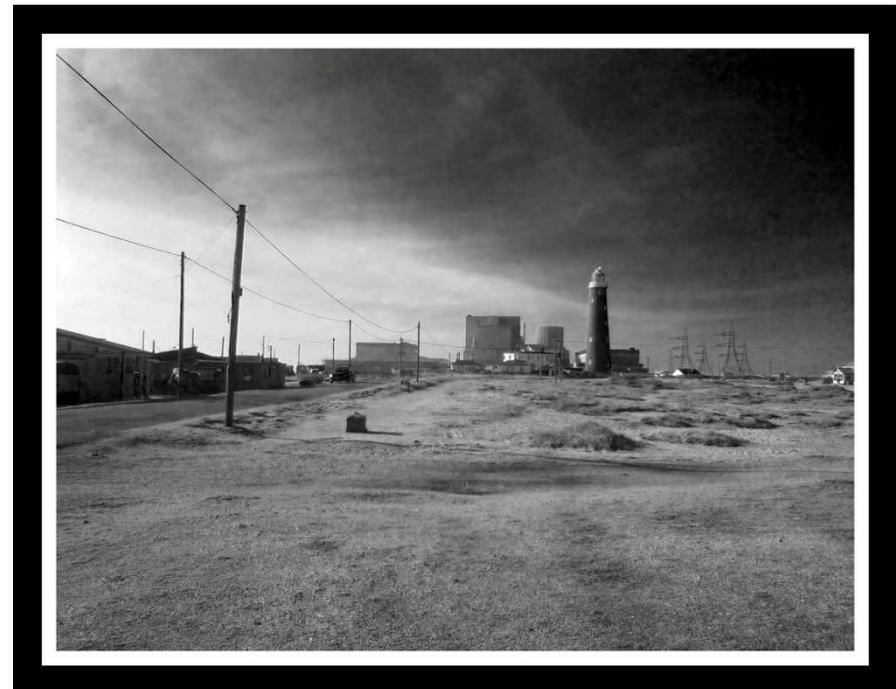
- ❖ Sono classificati in base al tipo di moderatore in:
 - ❖ Reattori a Grafite – Magnox, AGR, HTGR, RBMK
 - ❖ LWR – (Light Water Reactor) – PWR, BWR, VVER
 - ❖ HWR (Heavy Water Reactor) – CANDU, PHWR
- ❖ In base al tipo di fluido termovettore in:
 - ❖ Reattori raffreddati a Gas – Magnox, AGR, HTGR
 - ❖ Reattori raffreddati ad Acqua (leggera/pesante) – LWR, HWR, RBMK
- ❖ In base al tipo di ciclo in:
 - ❖ Pressurizzati (ciclo indiretto) – PWR, PHWR
 - ❖ Bollenti (ciclo diretto) – BWR

Evoluzione degli Impianti Nucleari di Potenza



Impianti Nucleari di Prima Generazione (GEN I)

- ❖ La tecnologia dei reattori sviluppati negli anni '50 e '60 è quella che ha dato luogo alla costruzione dei **Reattori Nucleari di Prima Generazione (GEN I)**. Questi impianti erano essenzialmente dei “prototipi” e, tranne qualche eccezione nel Regno Unito, nessuno di loro è più in esercizio.





Impianti Nucleari di Seconda Generazione (GEN II)

- ❖ **I Reattori Nucleari di Seconda Generazione (GEN II)** sono basati sulla tecnologia sviluppata tra gli anni '60 e '90 e sono quelli che hanno consentito il forte sviluppo dello sfruttamento pacifico dell'energia nucleare, soprattutto negli anni '70

Impianti Nucleari di Seconda Generazione (GEN II)

Centrale Elettronucleare “Enrico Fermi” –
Trino Vercellese (VC) – **PWR 300 MW_e** - (1964 – 1987)



Impianti Nucleari di Seconda Generazione (GEN II)

Centrale Elettronucleare Caorso (PC)
BWR 860 MW_e - (1981 – 1986)



Impianti Nucleari di Terza Generazione (GEN III)

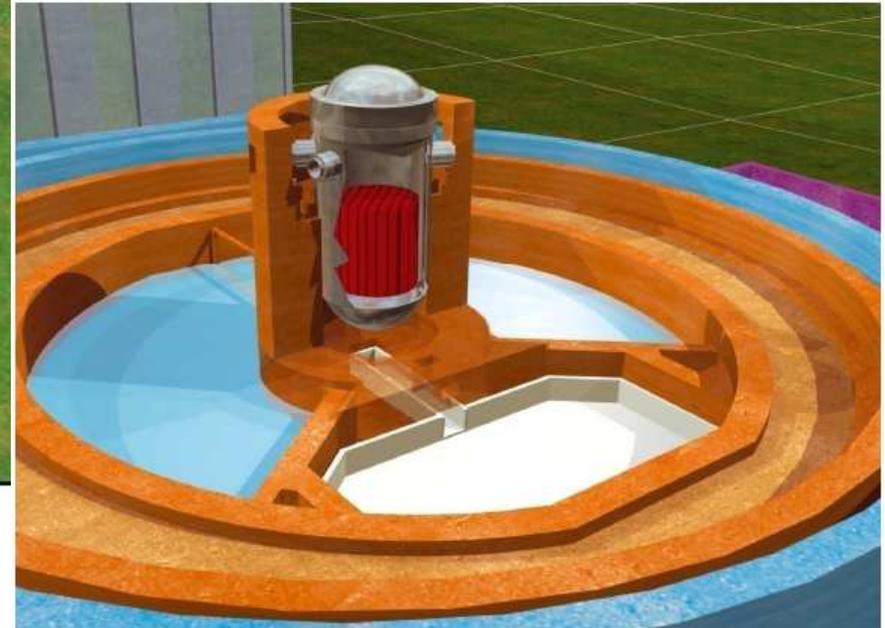
- ❖ La **Terza Generazione (GEN III)** di Reattori Nucleari è stata sviluppata a partire dagli anni '90 ed è costituita essenzialmente da impianti di tipo evolutivo rispetto alla generazione precedente, soprattutto per quanto riguarda l'economicità di esercizio e la sicurezza nucleare.
- ❖ Tra questi, gli impianti più innovativi, sono spesso indicati come **Generazione III+**
- ❖ Come nel caso degli impianti di GEN II, anche i reattori di **GEN III(+)** sono per la maggior parte filiere ad acqua leggera (LWR). Alcuni di questi sono già stati realizzati in Giappone, altri sono attualmente in costruzione o in corso di ordinazione

Impianti Nucleari di Terza Generazione (GEN III+)

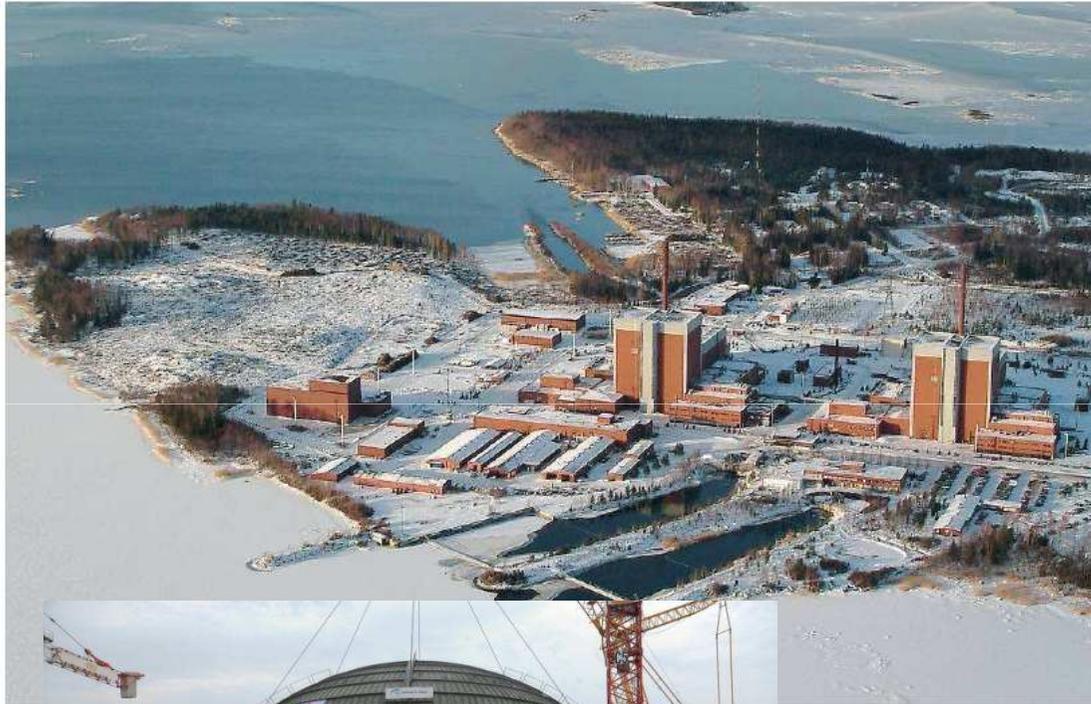
EPR: European Pressurized Reactor



EPR: European Pressurized Reactor



Impianti Nucleari di Terza Generazione (GEN III+)

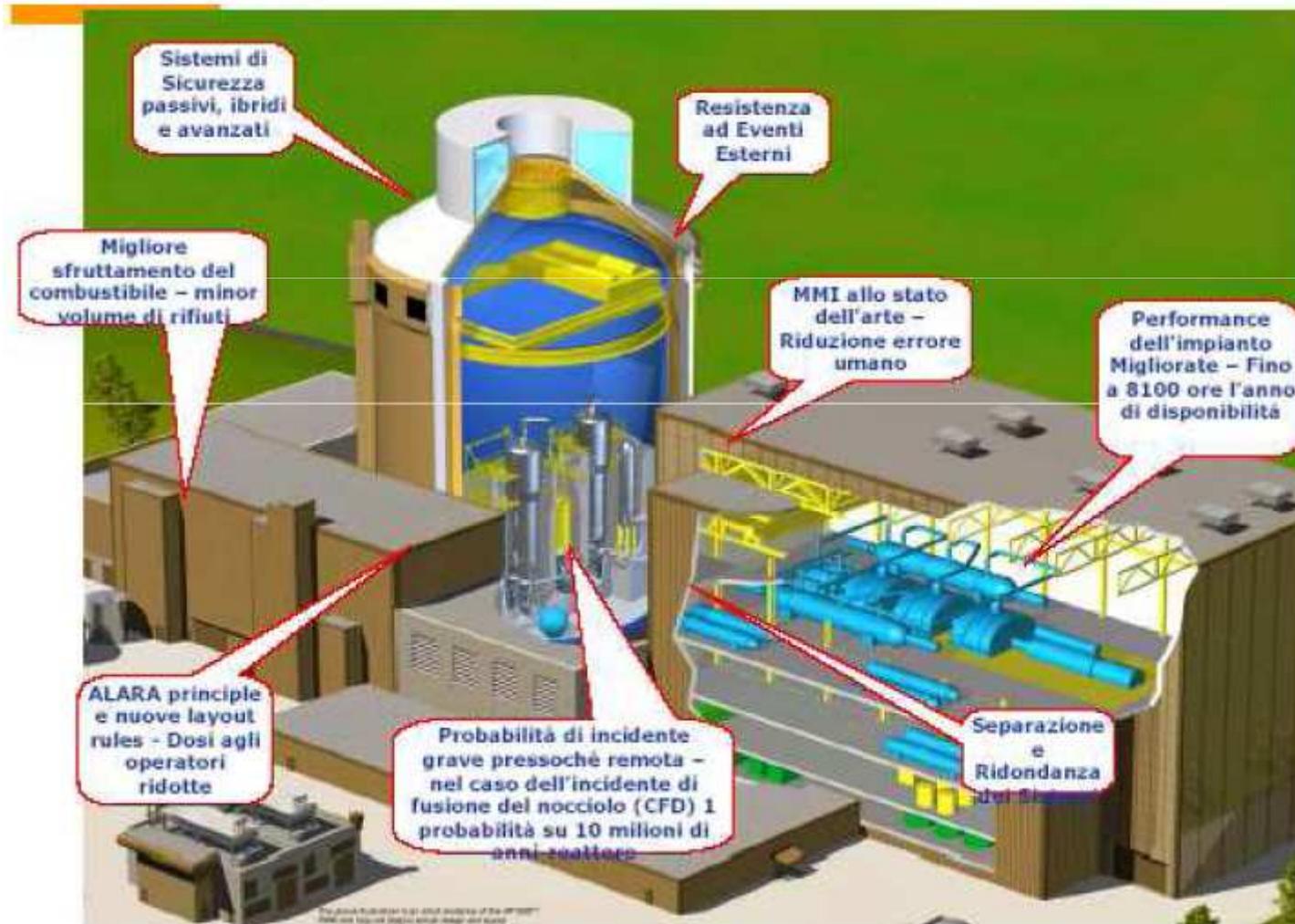


Olkiluoto (FIN) EPR

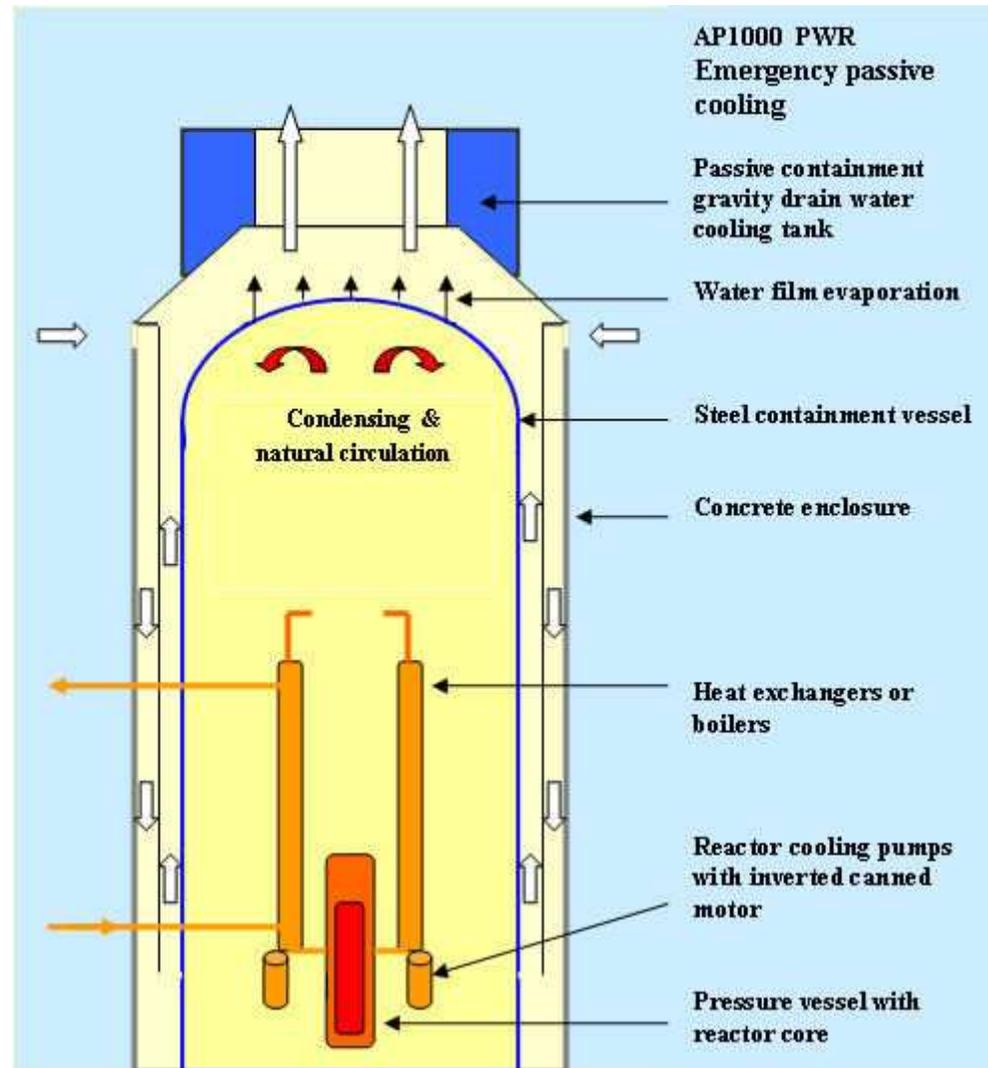


Impianti Nucleari di Terza Generazione (GEN III+)

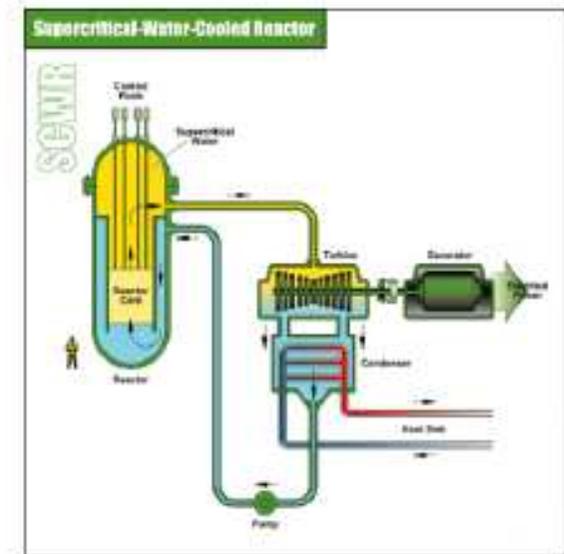
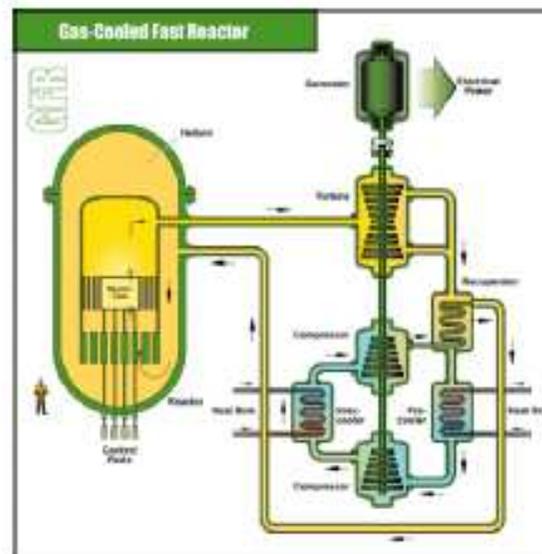
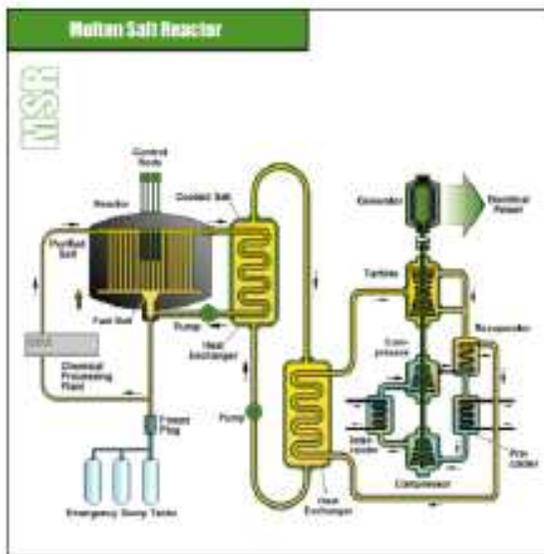
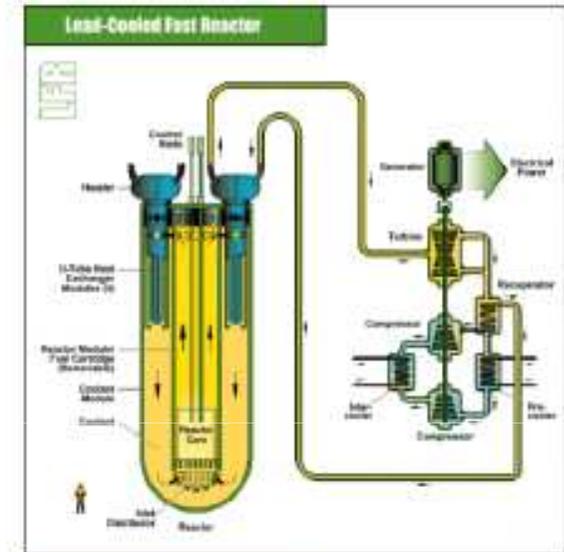
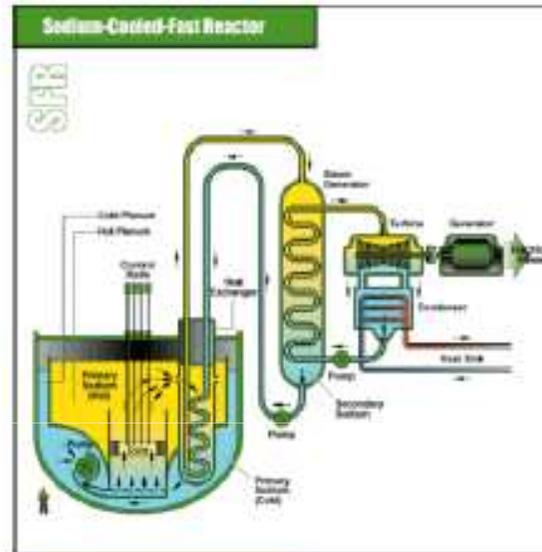
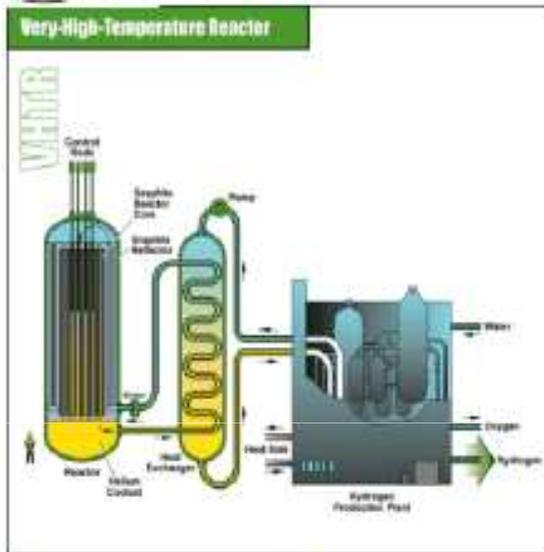
Schema Impianto AP-1000



Impianti Nucleari di Terza Generazione (GEN III+)



Impianti Nucleari di Quarta Generazione (GEN IV)





- ❖ Reattore Nucleare di Ricerca TRIGA Mark II della General Atomics da $250 \text{ kW}_{\text{th}}$ di potenza nominale
- ❖ Voluto dal prof. Mario Rollier raggiunse la prima criticità il 15 novembre 1965





- ❖ **Reattore termico da 250 kW** che offre numerose posizioni di irraggiamento con flussi di neutroni “in-core” **da 10^{12} a 10^{13} n $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$** (è disponibile un sistema d’irraggiamento pneumatico) e sei canali di irraggiamento “out-core” con flussi di neutroni da 10^6 a 10^{10} n $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
- ❖ **Combustibile:** Uranio arricchito al 20%
- ❖ **Moderatore/Refrigerante:** acqua leggera
- ❖ **Riflettore:** anello in grafite
- ❖ **3 barre di controllo:** 2 di carburo di boro e 1 in grafite borata
- ❖ **Irraggiamenti:** circa 400 ore/anno





L'acronimo **TRIGA** “*Training Research Isotope production General Atomics*” definisce le attività per le quali il reattore è stato progettato: il training e la formazione di personale, la ricerca nucleare in generale, la produzione di radionuclidi. Le principali attività di ricerca sono:

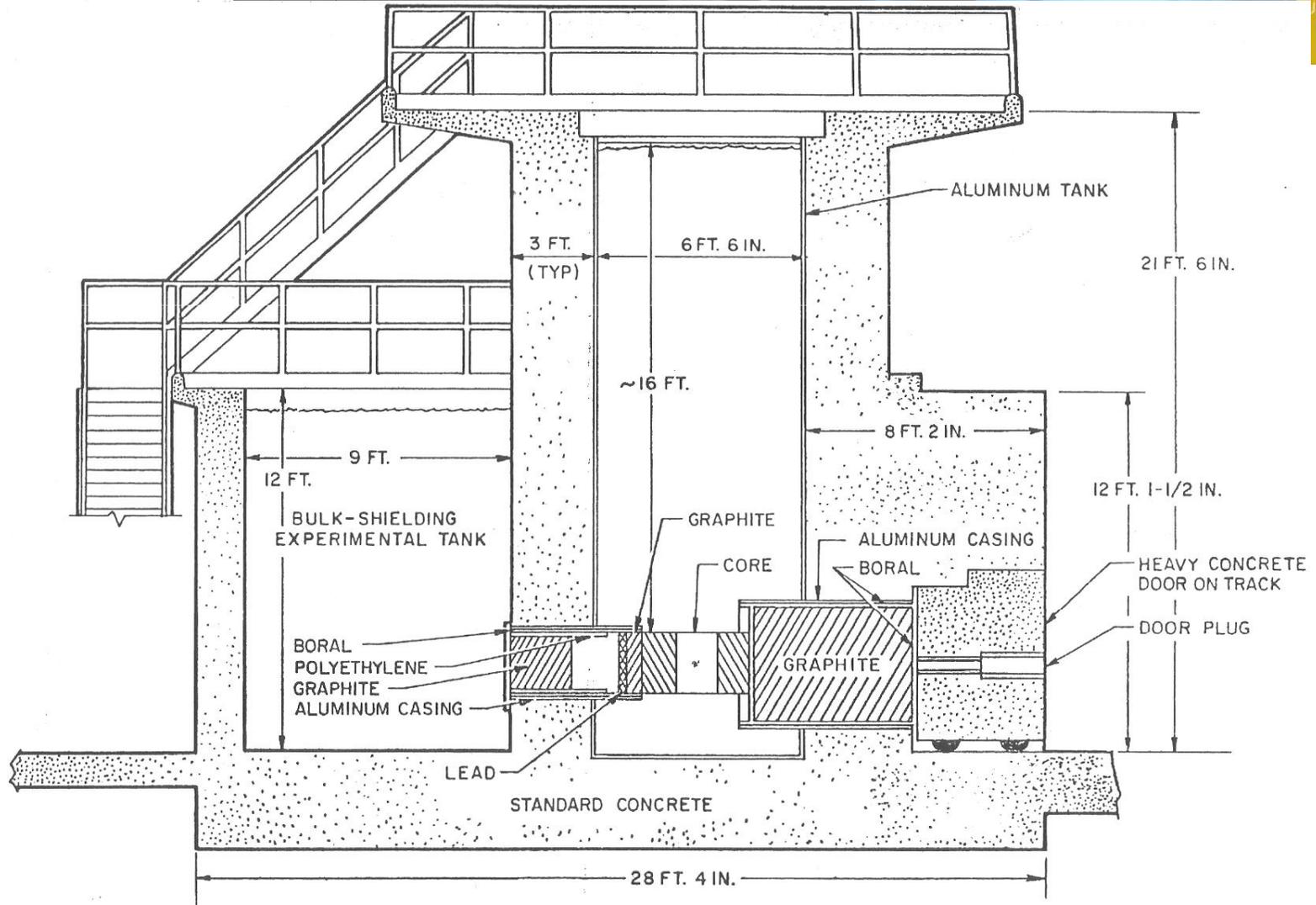
- ❖ analisi di materiali e di campioni ambientali per la determinazione di elementi in traccia mediante il metodo dell'analisi per attivazione neutronica
- ❖ terapia oncologica sperimentale per il trattamento di tumori epatici multifocali mediante irraggiamento con neutroni (**BNCT** - *Boron Neutron Capture Therapy*).
- ❖ studio dei danni indotti dalle radiazioni su componenti elettronici per applicazioni aerospaziali e per le macchine acceleratrici
- ❖ produzione di prodotti marcati per diagnostica medica

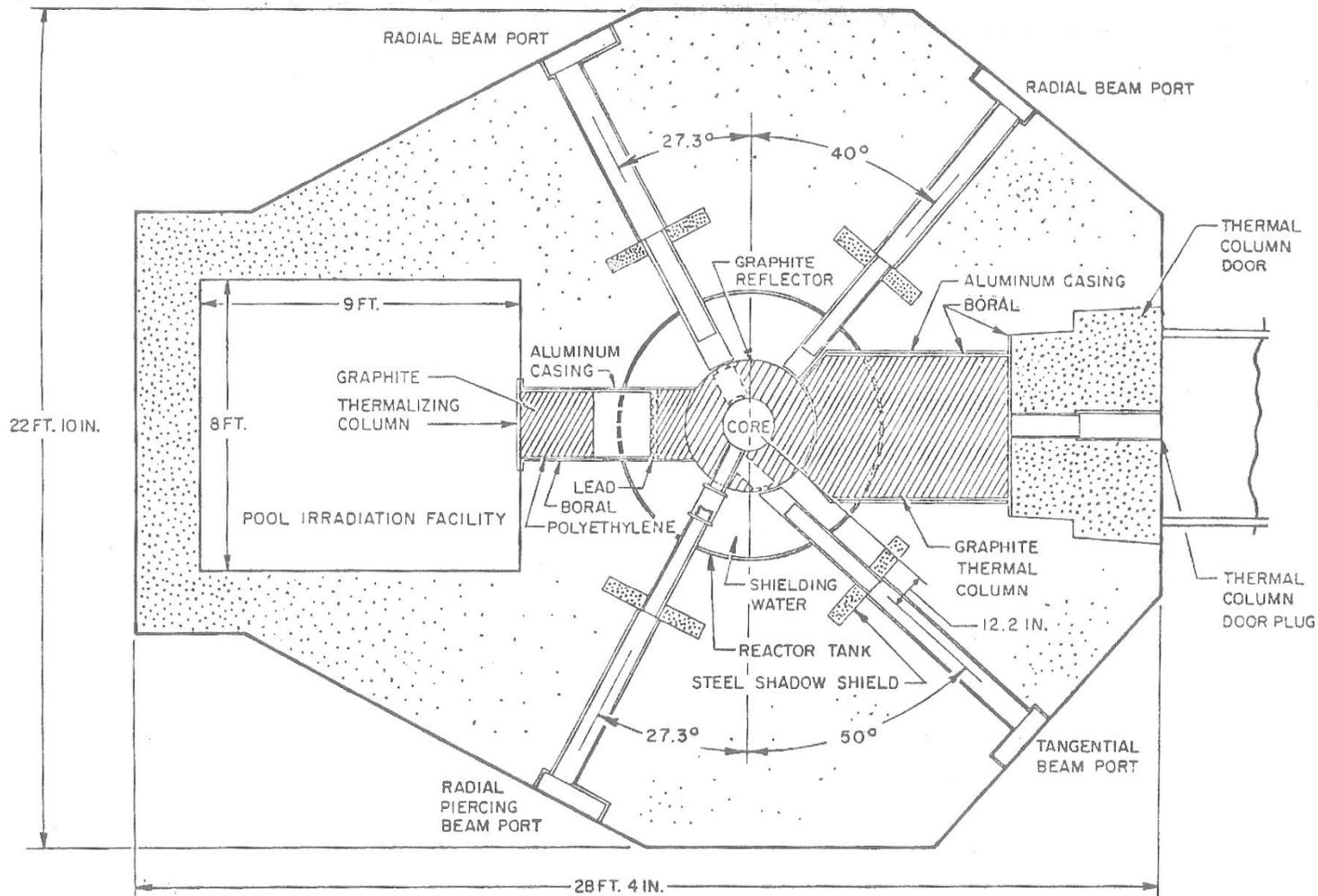


LENA

Laboratorio Energia Nucleare Applicata
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PAVIA

50°







http://www.corriere.it/cronache/11_marzo_17/triga-mark-II-reattore-nucleare-pavia_1107925e-509c-11e0-9bca-0ee66c45c808.shtml

CORRIERE DELLA SERA.it

stampa | chiudi

TRA LE SUE APPLICAZIONI C'È LA CURA DEI TUMORI EPATICI. «ED È ASSOLUTAMENTE SICURO»

Quel nucleare (buono) nel cuore di Pavia

Nel centro della città è attivo da 46 anni il Triga Mark II, uno dei 4 reattori italiani utilizzati a scopo di ricerca

PAVIA – Si chiama Triga Mark II, ha 46 anni ed è un eletto. E' uno dei quattro reattori nucleari italiani utilizzati a scopo di ricerca e si trova vicino al centro di Pavia: «A dir la verità – spiegano i tecnici del Laboratorio di Energia Nucleare Applicata dell'Università – nel 1965 questa zona era aperta campagna. Poi la città e l'Università si sono espanse e qui sono sorte case e residenze universitarie».

UN REATTORE «DIVERSO» - Il reattore ha una potenza nominale di appena 250 kW, circa 10mila volte inferiore rispetto al reattore di una centrale nucleare: «E' completamente diverso. Il nostro è un reattore a piscina, dotato di un sistema di autoraffreddamento, quindi molto sicuro. Inoltre non è



GRAZIE

PER

L'ATTENZIONE!



Cenni sulla gestione delle Scorie Nucleari

- ❖ **Low-level Wastes (LLW):** Comprendono carta, oggetti vari, vestiti, filtri, etc. che contengono piccoli quantitativi di radioisotopi prevalentemente a breve vita media. Non richiedono schermature per la manipolazione né per il trasporto e possono essere collocate in depositi superficiali senza problemi. Spesso, per ridurre il volume, vengono compattate o incenerite prima di essere collocate nei depositi. Rappresentano il 90% del volume totale delle scorie ma solamente l' 1% di inventario di radioattività.
- ❖ **Intermediate-level Wastes (ILW):** Contengono un maggior quantitativo di radioattività ed alcune richiedono di essere schermate. Comprendono tipicamente resine, fanghi, camicie del combustibile, materiali e componenti contaminati che provengono dall'impianto. Gli oggetti più piccoli e i materiali non-solidi possono essere inglobati nel cemento o nel bitume prima di essere collocati nei depositi. Rappresentano il **7%** del **volume** totale delle scorie e il **4%** di inventario di **radioattività**
- ❖ **High-level Wastes (HLW):** Derivano dall'impiego del combustibile nucleare. Contengono prodotti di fissione e elementi transuranici generati durante il funzionamento dell'impianto. Sono altamente radiattive e calde, quindi necessitano di pesanti schermature e di sistemi di raffreddamento. Possono essere considerate le "ceneri" del bruciamento del combustibile nucleare. Rappresentano il **3%** del **volume** totale delle scorie ma ben il **95%** di inventario di **radioattività**

Cenni sulla gestione delle Scorie Nucleari

- ❖ Una **centrale elettronucleare** da **1000 MW_e** (in grado di soddisfare il fabbisogno energetico di circa un milione di persone) produce ogni anno circa **100 m³** (equivalenti al volume di una stanza quadrata di 5 metri di lato e 4 metri di altezza) di rifiuti solidi e liquidi così ripartiti:
 - ❖ **90 m³** di rifiuti a bassa attività
 - ❖ **7 m³** di rifiuti a media attività
 - ❖ **3 m³** di rifiuti ad alta attività
- ❖ Una centrale di pari potenza **a carbone** produce ogni anno:
 - ❖ circa **310.000 m³** di rifiuti solidi
 - ❖ **1,2 milioni di m³** di polveri (di cui da 13 a 39 chili di uranio e da 32 a 96 chili di torio, elementi radioattivi rilasciati nell'ambiente circostante l'impianto)
- ❖ Una centrale di pari potenza **a olio combustibile** produce ogni anno:
 - ❖ circa **68,000 m³** di rifiuti solidi
 - ❖ **1,6 milioni di m³** cubi di polveri.

Cenni sulla gestione delle Scorie Nucleari

